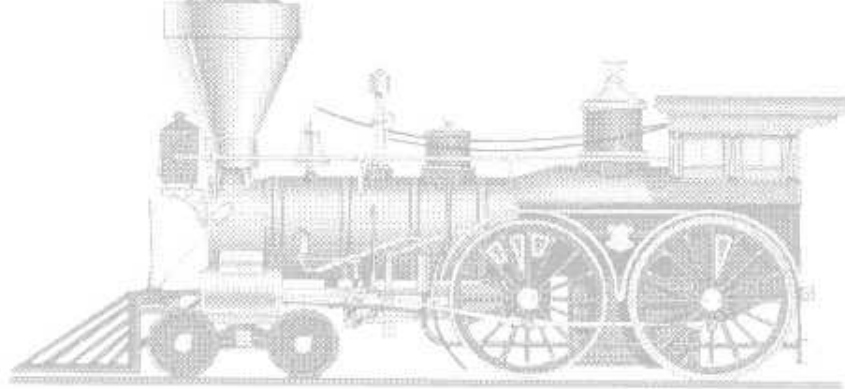
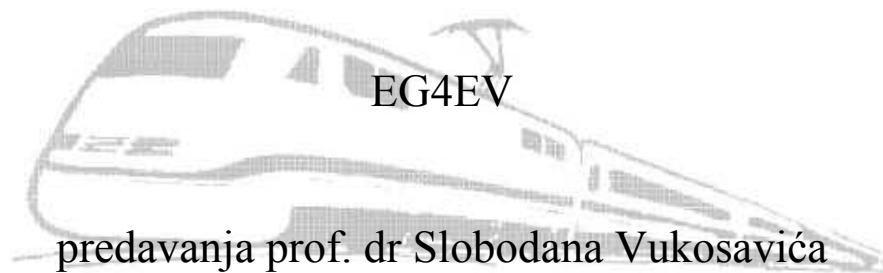


UNIVERZITET U BEOGRADU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET



ELEKTRIČNA VUČA

EG4EV



predavanja prof. dr Slobodana Vukosavića

-studentske beleške-



BEOGRAD, 2005. godine

SADRŽAJ

Uvod.....	5
1 Istorijat	6
2 Vučni zahtevi	15
2.1 Modelovanje vučnog sistema.....	17
2.2 Statička jednačina vučne sile	20
3 Dinamičko ponašanje vučnog sistema	20
4 Sile koje se opiru kretanju.....	25
4.1 Stalni otpori kretanju.....	25
4.1.a Trenje u ležajevima	25
4.1.b Trenje usled kotrljanja pogonskog točka	28
4.1.c Otpor vazduha	30
4.2 Povremeni otpori kretanju.....	31
4.2.a Otpori na usponu	31
4.2.b Otpori u krivini	33
4.3 Inercijalni otpori kretanju	43
5 Opšta jednačina vuče	44
6 Formulacija vučnih zahteva	48
7 Adhezija	53
7.1 Adheziona kriva	56
8 Uticaj elemenata elektrovučnog sistema na strminu mehaničke karakteristike.....	63
9 Uticaj neelektričnih veličina na iskorišćenje adhezije	70
9.1 Uticaj konstrukcije lokomotive.....	70
9.2 Uticaj stanja šina	72
10 Putni dijagrami.....	75
10.1 Primer optimizacije putnog dijagrama.....	79
11 Pregled postojećih elektromotora sa osvrtom na njihovu primenu u električnoj vuči	83
11.1 Motori jednosmerne struje	84
11.1.a Motor jednosmerne struje sa rednom pobudom.....	84
11.1.a.1 Reostatska regulacija vučne sile.....	90
11.1.b Motor jednosmerne struje sa nezavisnom pobudom.....	122

12 Nedisipativna regulacija vučne sile uz pomoć čopera	126
12.1 Čoper spustač napona ("buck").....	128
12.2 Čoper podizač napona ("boost")	132
12.3 Čoper obrtač napona ("buck - boost")	134
12.4 Čoper spustač napona (BACK) sa rekuperacijom (Tranzistorski vučni čoper).....	136
12.5 Praktična realizacija tranzistorskog vučnog čopera.....	142
12.6 Regulacioni blok dijagram tranzistorskog vučnog čopera sa IGBT	155
12.7 Tiristorski vučni čoper	158
12.8 Tiristorski nerecuperativni čoper sa tiristorima za automatsko slabljenje polja.....	160
12.9 Bilans utrošene električne energije	163
12.10 Vozila za brz prevoz putnika (RPTS - Rapid Passanger Transportation System).....	163
12.10.a Pomoćna oprema vozila za masovni prevoz putnika	165
13 Jednofazne lokomotive	167
13.1 Vučni motori koji se koriste u lokomotivi	170
13.2 Diodne lokomotive.....	177
13.3 Tiristorske lokomotive	184
13.4 Rekuperativno kočenje.....	194
13.5 Tiristorska implementacija slabljenja polja kod jednofaznih lokomotiva	198
13.6 Augijeva sprega	202
13.7 Prenaponska zaštita tiristora u tiristorskoj lokomotivi.....	206
13.8 Mašine za naizmjenične struje (MNS).....	210
13.8.a Izvođenje modela mašine za naizmjeničnu struju.....	226
13.8.a.1 Modelovanje statora mašina za naizmjeničnu struju.....	226
13.8.a.2 Modelovanje rotora mašina za naizmjeničnu struju.....	228
13.8.a.3 Model mašine za naizmjeničnu struju.....	229
13.8.a.4 Obrtna dq transformacija.....	230
13.8.b Sinhroni vučni motor	235
13.8.b.1 Izvođenje zamenske šeme statora SM za stacionarana stanja	241
13.8.b.2 Karakteristični režimi rada.....	242
13.8.b.2.1 Polazak.....	242
13.8.b.2.2 Oblast slabljenja polja.....	244

13.8.b.3 Sinhroni motor sa permanentnim magnetima na rotoru	249
13.8.b.4 Eksplatacione karakteristike (trjni rad)	255
13.8.b.5 Tranzijentne karakteristike (kratkotrajni rad)	260
13.8.c Asinhroni vučni motor	260
13.8.c.1 Izviđenje zamenske šeme AM za stacionarna stanja	263
13.8.c.2 Režimi rada AM	266
13.8.c.3 Eksplatacione i tranzijentne karakteristike AM	278
13.8.d Linearni indukcion motor (LIM-Linear Induction Motor)	279
13.8.e Prekidački reluktantni motori (SR motori - Switched Reluctance Motor)	285
13.8.e.1 Pretvarač za napajanje SR motora	293
14 Dizel-elektične lokomotive	294
15 Električni i hibridni automobili	300
15.1 Električna šema pogonskog sistema električnog automobila	303
15.2 Trofazni tiristorski invertor kao vučni pretvarač u električnom automobilu	307
16 Vozila sa zamajcem	312
PREPORUČENA LITERATURA:	315

Uvod

Podela vozila može da se izvrši na nekoliko načina.

1. Po načinu napajanja energijom razlikuju se:

a) autonomna vozila;

(Rezervoar energije koji je potreban za kretanje imaju sa sobom, što predstavlja izvesnu nepraktičnost, ili na sebi imaju zamajac, što znači da je vozilo uslovno autonomno.)

b) napajana vozila.

(Na sebi nemaju nikakav izvor električne energije pa se napajanje obezbeđuje preko provodnika.)

2. Po načinu oslanjanja na podlogu, tj. po ogibljenju, razlikuju se:

a) drumska vozila;

(Točak je od pneumatika sa relativno velikim ugibanjem.)

b) šinska vozila;

(Točak je od čelika, podloga je tvrda, ugibanje je mnogo manje.)

c) vozila sa levitacijom.

(Nema kontakta sa podlogom, što znači da nema te vrste trenja. Ispod vozila može da bude nadpritisak pri čemu su vozila na vazdušnom jastuku, ili može da se koristi magnetna levitacija pri čemu se indukuje magnetno polje u podlozi najčešće preko namotaja u samom vozilu. Ovde nema točkova pa se koristi linearni motor. Lebđenje je od značaja za ostvarenje velikih brzina, čak i do 500 [km/h]. Mana ovakvih vozila je u malom stepenu iskorišćenja motora $\eta=0.65-0.68$. (Više reči o ovom tipu vozila ce biti kasnije u tekstu.)

3. Tipovi vučnih motora koji se koriste u električnoj vuči:

a) obrtne mašine (motori jednosmerne struje, asinhroni i sinhroni motori, reluktantni motori);

b) linearni motori.

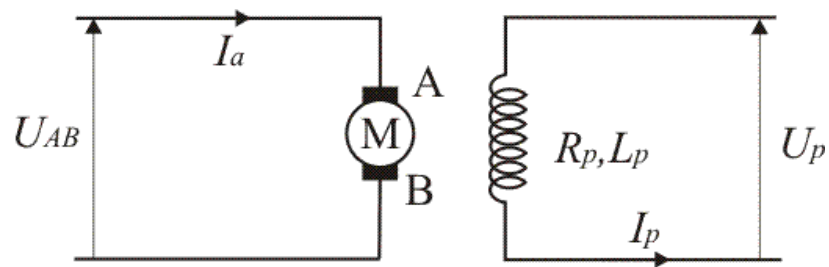
4. Načini upravljanja vučnom silom:

- a) disipativno (postoji gubitak električne snage);
- b) nedisipativno (koriste se čoperi, nema gubitka električne snage).

1 Istorijat

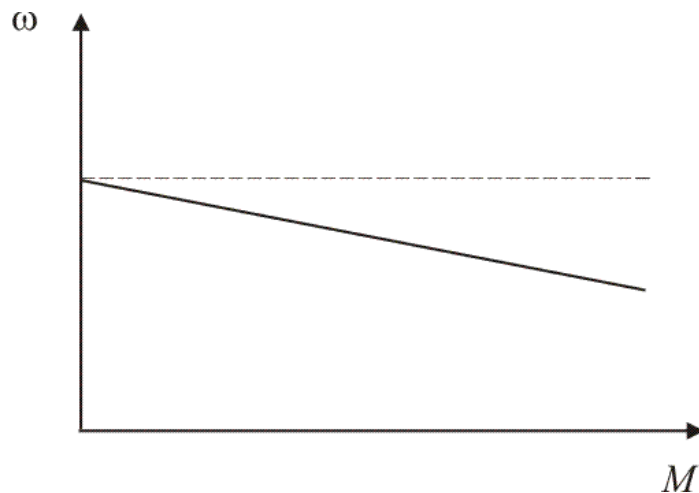
Prva električna vuča ostvarena je 1812. godine u Rusiji, u Petrogradu, na reci Nevi, električnim pokretanjem jednog brodića. Kao vučni motor korišćen je redni motor jednosmerne struje, a kao napajanje jedan akumulator - izvor jednosmernog napona.

Pre svega daćemo elementarne karakteristike vučnog pogona sa motorom jednosmerne struje sa nezavisnom pobudom. Električna šema ovog motora data je na slici:



Slika br.1.1. Zamenska šema motora jednosmerne struje sa nezavisnom pobudom

Mehanička karakteristika ovog motora je na slici:

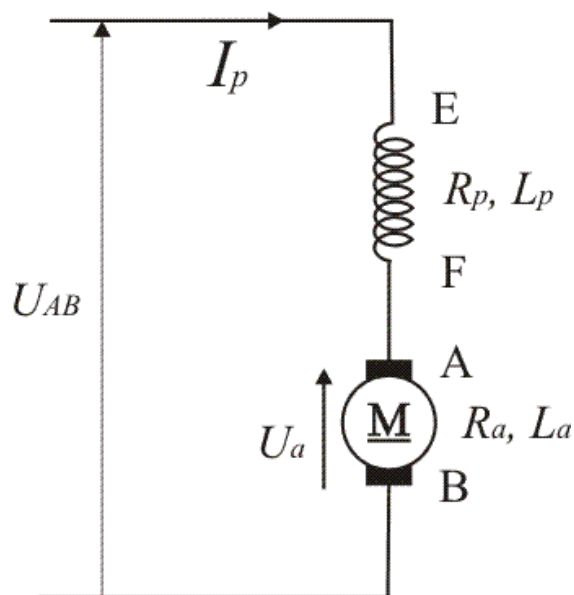


Slika br. 1.2. Mehanička karakteristika motora JS sa nezavisnom pobudom

Na osnovu mehaničke karakteristike vidi se da motor jednosmerne struje sa nezavisnom pobudom nije pogodan zbog toga što radi u uskoj oblasti oko brzine praznog hoda. Kod ove karakteristike strmina je velika, odnosno tvrda.

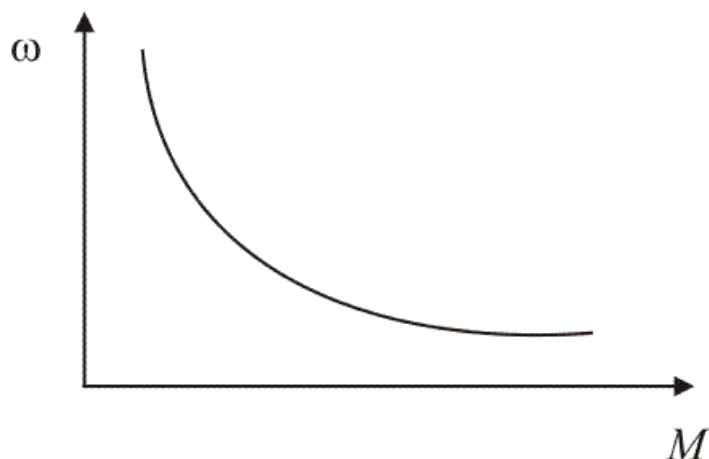
Brzina ovog motora se menja promenom napona U_{AB} . To se u XIX veku radilo vezivanjem električnog otpora pa su se imali veliki gubici električne energije.

Redni motor jednosmerne struje ima električnu šemu kao na slici :



Slika br.1.3. Zamenska šema motora jednosmerne struje sa rednom pobudom

Njegova mehanička karakteristika je na slici :

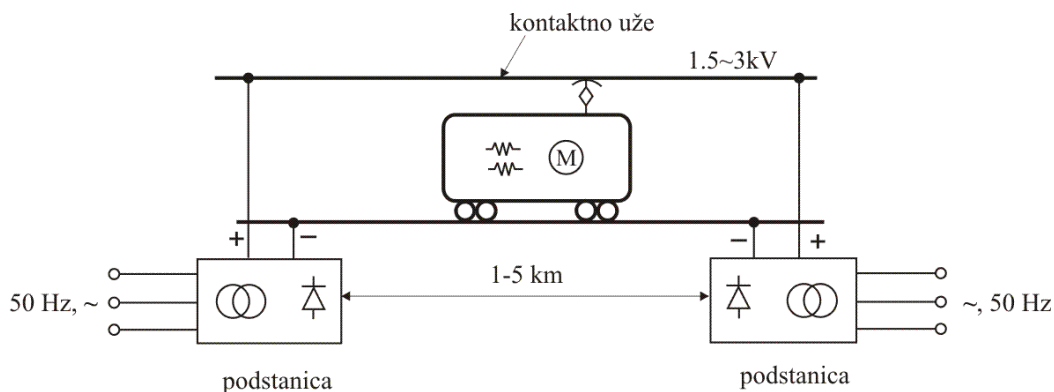


Slika br.1.4. Mehanička karakteristika motora JS sa rednom pobudom

Glavni razlog za korišćenje je taj što je mehanička karakteristika meka. Njegova karakteristika ima oblik hiperbole konstantne snage. Ovaj motor ima osobinu autoregulacije, tj. kada npr. lokomotiva naiđe na uzbrdicu, poveća se moment ali opada brzina motora, što znači da električna snaga ostaje približno ista.

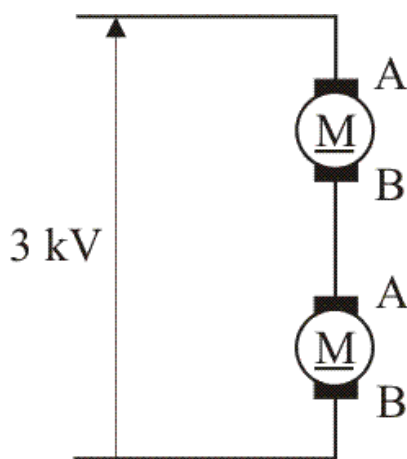
Ovi motori imaju velike snage i moraju se napajati iz izvora koji nije na lokomotivi. Napajanje se vrši iz kontaktne mreže sa kojom je lokomotiva elastično spregnuta pomoću pantografa. Energija se dovodi iz podstanica koje su smeštene pored pruge. Podstanice se napajaju naizmeničnim naponom sa primarne strane.

Pomoću transformatora se taj napon snižava i ispravlja pa se dovodi na kontaktno uže. Za ispravljače nekada su se koristile živine usmerače, a danas se koriste silicijumski poluprovodnički elementi.



Slika br.1.5. Električna šema veza napajanja kontaktnog užeta

Naponi su bili u početku 600 do 700 [V] (danas u tramvajima i trolejbusima) a nešto kasnije 1200 do 1500 [V] (danas u podzemnoj železnici). Za snagu od 1 [MW] potrebna je, dakle, struja od oko 1000 [A], pa se ovde javlja problem poprečnog preseka i težine užeta (mehanička čvrstoća kontaktnog užeta bi bila ugrožena velikim zagrevanje usled struja i od 1 [kA]), a i rastojanje podstanica bi moralo da bude malo zbog padova napona (električni parametri kontaktnog užeta (voda), i ako imaju malu podužnu vrednost, pri velikim strujama stvaraju značajne seriske padove napona). To se može rešiti uvećanjem napona, ali nije moguće napraviti dobre motore za taj napon (problem je u tome što napon između kriški komutatora ne sme nikako preći vrednost kritičnog napona proboja vazduha koji iznosi oko 30V/mm). Pokušano je rednim vezivanjem dva motora čime se napon duplira, npr. 3 [kV] kao na slici.



Slika br.1.6. Redna veza dva vučna motora radi povećanja napona napajanja odnosno smanjenja struje kontaktnog užeta

Taj napon je i danas u upotrebi u nekim srednjeevropskim zemljama. Ovo rešenje nije dobro jer usled kvara jednog motora, stradaće i drugi motor. Razlog za današnje korišćenje ovog napona je u konzervativnosti železnice: promena infrastrukture je veoma skupa pa se maksimalno koriste postojeći resursi.

Snaga od 1 [MW] je mala za voz. Povećanje snage se ostvaruje povećanjem napona i to je jedini način jer postoje ograničenja kontaktnog užeta u pogledu povećanja struje. Na kontaktni vod se dovodi naizmenični napon. Njegova vrednost je

15 [kV], rastojanje podstanica sada je 50 [km], a snage lokomotiva oko 15 [MW]. U lokomotive se smešta transformator kojim se napon spušta na potrebnu vrednost.

Sada se postavlja pitanje upotrebljenog motora. Bilo je nastojanja da se upotrebi trofazni asinhroni motor napajan sa tri užeta. Ovo rešenje nije pogodno zbog toga što je mnogo tri užeta za napajanje i što je prirodna karakteristika asinhronog motora tvrda pa da bi se vršile promene brzine mora se menjati učestanost napajanja (što nije bilo nimalo praktično u XIX veku).

Lokomotive se napajaju tako što postoji jedno kontaktno uže a povratni vod je šina (monofazno). Nivo napona se reguliše transformatorom. U staro vreme bilo je teško ugraditi ispravljače u lokomotivu zbog toga što su bili veoma veliki, pa su se stavljali samo u podstanice.

Razmotrimo redni motor jednosmerne struje.

Elektromagnetni momenat je:

$$M_{em} = k_m \phi \cdot i_a \quad (1.0.1)$$

Fluks je (ako magnetno kolo nije zasićeno):

$$\phi(t) = \frac{L_p}{N_p} i_p(t) \quad (1.0.2)$$

Za redni motor važi:

$$i_p = i_a \quad (1.0.3)$$

Sledi da je elektromagnetni momenat:

$$M_{em} = k_m \frac{L_p}{N_p} i_a^2 \quad (1.0.4)$$

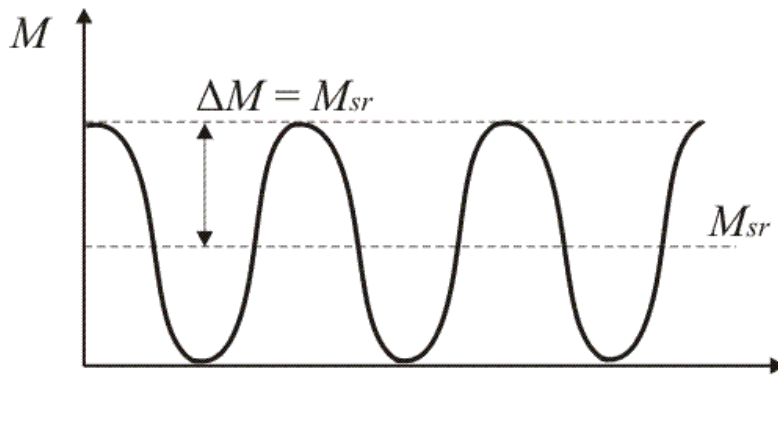
Struja i_a je prostoperiodična:

$$i_a = I_m \cos(\omega t) \quad (1.0.5)$$

Konačno, za elektromagnetni momenat važi:

$$M_{em} = k_m \frac{L_p}{N_p} I_m^2 \cos^2(\omega t) = \frac{1}{2} k_m \frac{L_p}{N_p} I_m^2 (1 + \cos 2(\omega t)) \quad (1.0.6)$$

Vidi se da je elektromagnetni momenat pulsacioni, sa učestanošću pulsacije koja je dva puta veća od mrežne učestanosti, što je prikazano na slici:



Slika br 1.7. Vremenski oblik elektromagnetnog momenta vučnog motora

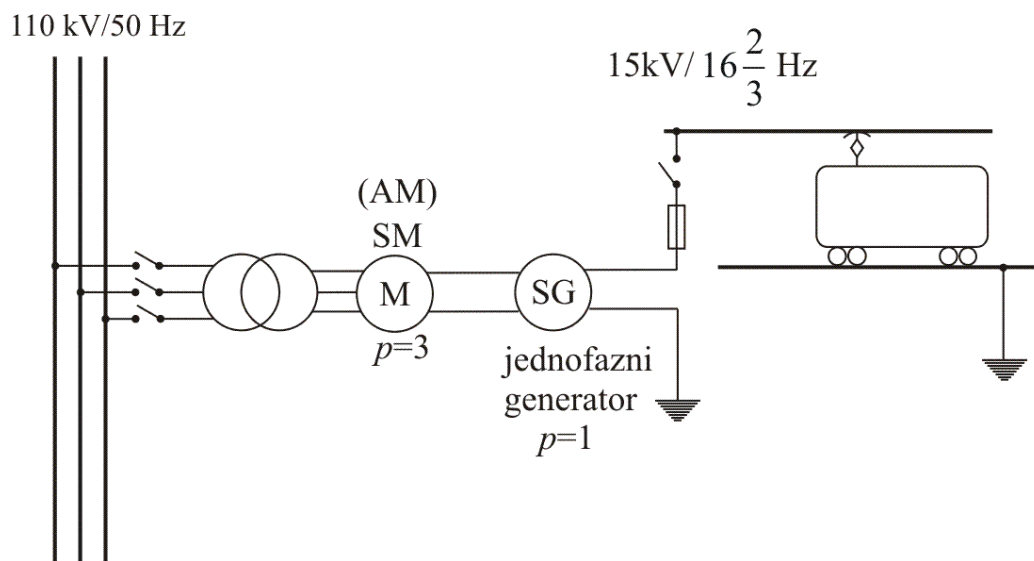
Zbog inercije masa u motoru pulsiranje momenta se praktično ne oseća.

Redni motori jednosmerne struje koji se napajaju naizmeničnom strujom nazivaju se kolektorski motori (primer: kod usisivača i mlinova za kafu. [Njihov veliki problem je komutacija. Tada se stvara usijana plazma - varnica, koju rotor razvlači. Od manje varnice se može napraviti krupnija varnica tj. kružna vatra. To može da dovede do opasnih kratkih spojeva jer ta varnica predstavlja provodnu sredinu \(luk\).](#) Problem komutacije kod kolektorskih motora ne zavisi od brzine obrtanja, taj problem postoji i kod većih i kod manjih brzina.

Kod rednog motora jednosmerne struje nema problema komutacije i dobre su mu karakteristike pri polasku.

Pokušano je da se u lokomotivama ugradi promenljivi transformator. Tako se ostvarila mogućnost regulisanja napona transformacije. Kao promenljivi transformator počeo je da se koristi autotransformator-graduator.

Promenom napona napajanja reguliše se brzina. Problem komutacije smanjen je smanjenjem učestanosti na $16\frac{2}{3}$ [Hz]. Tako je počeo da se koristi sistem napajanja 15 [kV] i $16\frac{2}{3}$ [Hz]. Ova učestanost je dobijena tako što je u podstanici postojao trofazni sinhroni motor sa $p=3$ (tri para polova) na koji je bio priključen sinhroni generator sa $p=1$ (jedan par polova). To je prikazano na sledećoj slici:



Slika br. 1.8. Električna šema veza napajanja kontaktnog užeta pri smanjenoj učestanosti

Na niže učestanosti se nije išlo i ova učestanost je dobijena optimizacijom.

Objasnimo sada vezu između dimenzija transformatora, njegove snage i učestanosti f . Površina provodnika u transformatorima zavisi od kvadrata linearne dimenzije, odnosno:

$$S_{Cu} \sim l^2. \quad (1.0.7)$$

Isto tako površina magnetnog kola zavisi od linearne dimenzije kao:

$$S_{Fe} \sim l^2. \quad (1.0.8)$$

Snaga transformatora se može izraziti i na sledeći način:

$$S_T \approx E \cdot i \sim (N \cdot e_1) \cdot i \sim (\phi_{\max} \cdot f) \cdot (N \cdot i) \quad (1.0.9)$$

Kako je:

$$\phi_{\max} = B_{\max} \cdot S_{Fe} \quad \text{ i } \quad i = \Delta \cdot S_{Cu} \quad (1.0.10)$$

gde Δ predstavlja gustinu struje, S_{Cu} površinu provodnika a $B_{\max}$ amplitudu magnetne indukcije.

Sada možemo napisati

$$S_T \sim (B_{\max} \cdot S_{Fe} \cdot f) \cdot (N \cdot \Delta \cdot S_{Cu}) \sim S_{Fe} \cdot S_{Cu} \sim l^4 \quad (1.0.11)$$

$$S_T \sim f \cdot l^4 \cdot B_{\max} \cdot \Delta \quad (1.0.12)$$

Kako su veličine $B_{\max}$ i gustina struje Δ konstantne veličine za jedan transformator dobijamo da snaga zavisi od:

$$S_T \sim f \cdot l^4 \quad (1.0.13)$$

tako da imamo da je dimenzija obrnuto srazmerna frekfenciji za istu snagu transformatora:

$$l^4 \sim \frac{1}{f}. \quad (1.0.14)$$

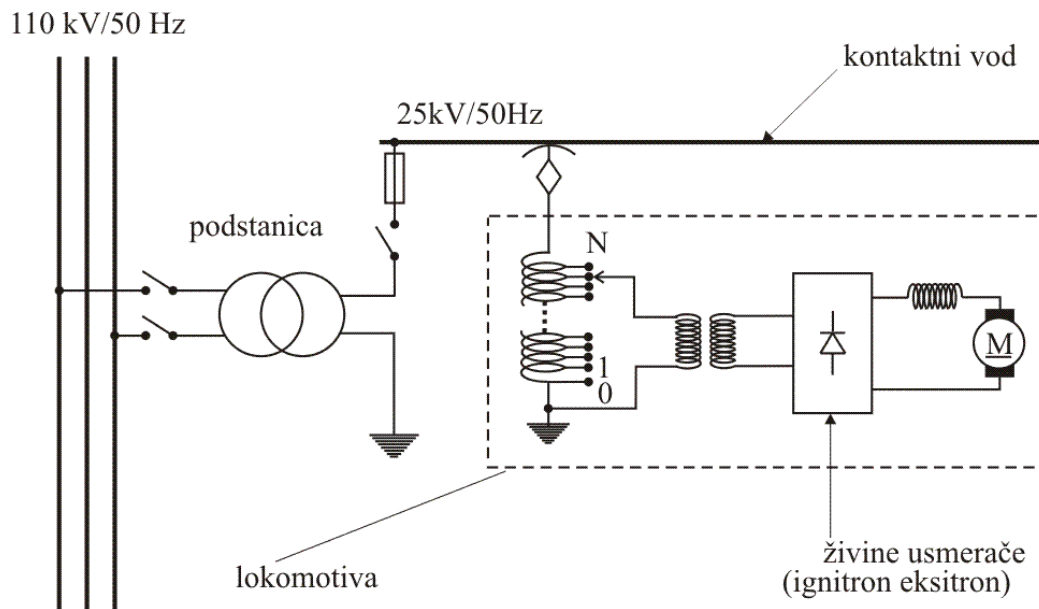
To nas dovodi do zaključka da ako imamo transformator u lokomotivi koji radi na $16\frac{2}{3}$ [Hz], on je 3 puta teži od onog koji radi na 50 [Hz]. Vidi se da je snaga srazmerna $I^2 \cdot \omega$, pa se može zaključiti da je većim smanjenjem učestanosti i da bi snaga ostala ista, potrebno ugraditi po dimenzijama veći transformator u lokomotivu, što nije povoljno. Druga nepovoljnost je ta što bi se velikim smanjenjem učestanosti smanjila i učestanost pulsacija kod kolektorskog motora pa bi se pulsiranje osutilo prilikom kretanja (ne bi bilo savladano inercijom masa).

Iz ekonomskog razloga je odabran napon od 15 [kV]. On dovoljno umanjuje struju i nema problema sa izolacijom kao kod 110 [kV].

Ovakvi sistemi danas postoje u Nemačkoj i Skandinaviji zbog konzervativnosti železnice.

Posle Drugog svetskog rata napravljeni su dovoljno mali ispravljači. Koriste se sistemi sa promenljivim transformatorom (graduatom) i ispravljačima u lokomotivi. U upotrebi je redni motor jednosmerne struje koji se napaja jednosmernom strujom, što omogućava da učestanost napajanja može da bude 50 [Hz] i da se eliminiše u podstanicama grupa motor - generator za sniženje frekvencije. Nema problema komutacije kolektorskog motora. U podstanicama je običan transformator 110/25 [kV]/[kV]. Ovaj napon ide na lokomotivu u kojoj su autotransformator (graduatom), ispravljač i redni motor jednosmerne struje. Ovakav sistem se pojavio prvo u Francuskoj.

Šema je data na slici:



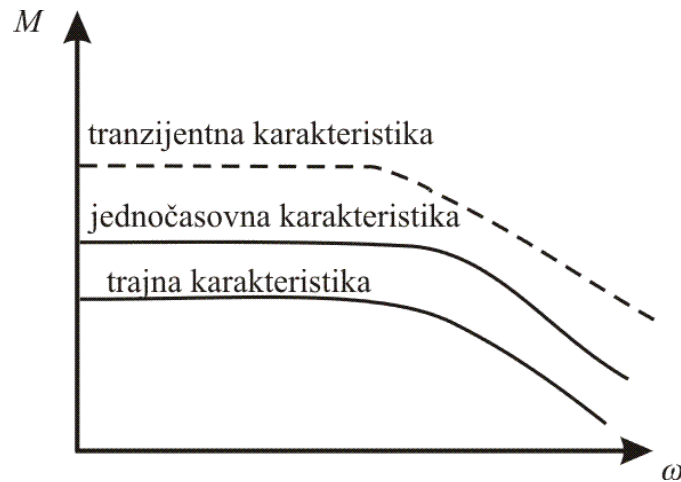
Slika br.1.9. Električna šema veza napajanja kontaktnog užeta bez smanjivanja učestanosti

2 Vučni zahtevi

Vučni zahtevi pokazuju kako se na deonici menjaju vučna sila i brzina vučnog motora.

Bavimo se analizom šinskih i drumskih vozila, odnosno vozila sa točkovima. U našoj analizi je prisutan prenosni odnos sa prenosom i .

Posmatraćemo karakteristiku zavisnosti momenta od ugaone brzine kod vučnog motora:



Slika br.2.1. Prikaz tri karakteristične karakteristike svakog vučnog motora
trajna karakteristika – dozvoljen trajan rad: jednočasovna karakteristika–
maksimalno se u tom radnom režimu možemo naći 1 sat: tranzijentna karakteristika–
dozvoljeni su samo kratkotrajni (trenutni) radni režimi

Na slici uočavamo 3 karakteristike:

- Trajna eksploataciona karakteristika je geometrijsko mesto tačaka u $M-\omega$ dijagramu, koja daje set (uređen par) vrednosti moment-brzina koje u trajnom radu motor može da postigne. To je funkcionalna zavisnost momenta od brzine obrtanja u trajnom radu. Ona predstavlja eksploatacionu karakteristiku koja govori o nivou opterećljivosti motora. Vezana je za zagrevanje. Ako se izađe izvan karakteristike, raste temperatura što predstavlja opasnost za motor, za njegovu izolaciju, ležajeve itd. Ova karakteristika nije mehanička karakteristika poznata iz teorije električnih mašina jer ta mehanička karakteristika daje zavisnost za stacionarno stanje pri nepromenjenim uslovima napajanja.

- Jednosatna eksploataciona karakteristika je geometrijsko mesto tačaka u $M-\omega$ dijagramu, koja daje set vrednosti moment-brzina koje motor može zadovoljiti u trajanju od jednog časa, a da ne dođe do zagrevanja koje može da ošteti motor. Ona se nalazi između trajne i tranzijentne karakteristike. Merodavna je za izbor motora.

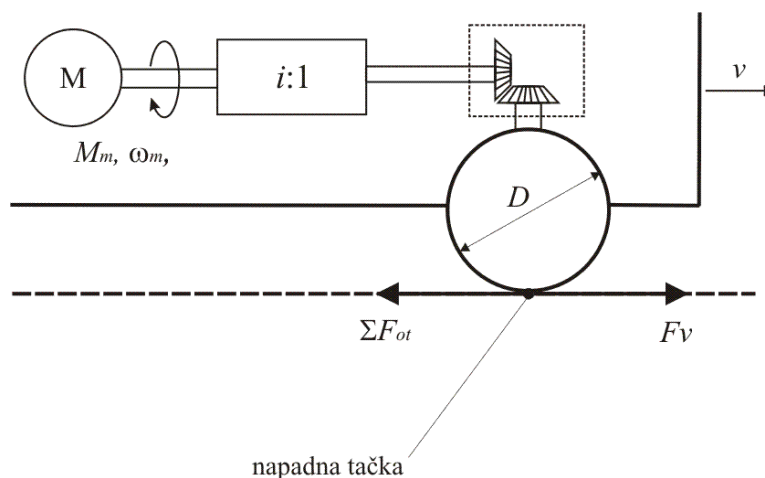
- Tranzijentna eksploataciona karakteristika je geometrijsko mesto tačaka u $M-\omega$ dijagramu i kazuje koliki momenat može kratkotrajno da se razvije za datu brzinu. Taj slučaj postoji kod pokretanja motora koji je otperećen (npr: vučni motor).

Može se uzeti da to kratko trajanje iznosi deseti, odnosno stoti deo termičke vremenske konstante τ .

Danas su u električnoj vuči uglavnom zastupljeni asinhroni motori sa vučnim pretvaračima.

2.1 Modelovanje vučnog sistema

Na sledećoj slici posmatramo model vučnog sistema:



Slika br.2.1.1. Model (mehanički) vučnog sistema

Elementi modela su:

1. Motor:

Njegov moment inercije je J_m . Elektromagnetni momenat motora je M_{em} . U motoru postoje gubici. Svaka električna mašina ima gubitke energije (električne, mehaničke, dodatne) pa se kod motora na osovini dobija manji momenat od elektromagnetnog.

2. Prenosni mehanizam:

Sastoji se od sistema zupčanika i ne menja snagu koju prenosi. Postavlja se zato što motori zbog svojih relativno malih dimenzija imaju velike brzine koje nisu za praktičnu upotrebu u električnoj vuči.

Gabarit motora isključivo zavisi od momenta a ne od snage. Objasnimo. Od značajnog interesa je postizanje manjih dimenzija vučnih motora. Time se smanjuje količina korišćenog materijala u izradi motora, što značajno smanjuje troškove, a postiže se i manja masa motora. Dimenzije motora zavise od momenta a ne od snage. Moment je proporcionalan četvrtom stepenu linearne dimenzije motora l^4 , odnosno $V^{4/3}$, gde je V zapremina motora.

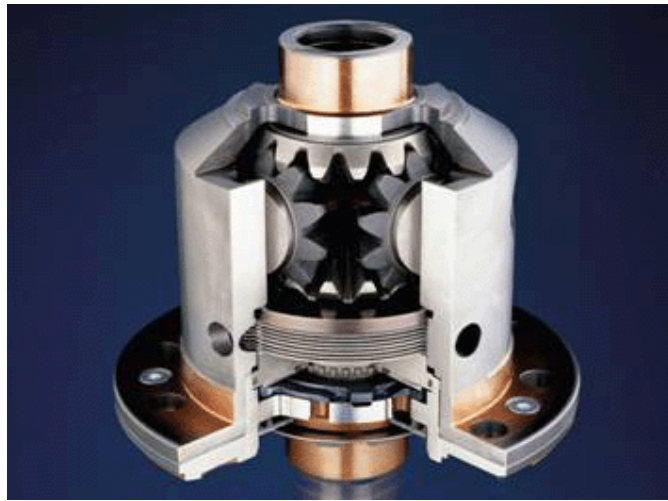
$$P = U \cdot I \sim B_m \cdot \omega \cdot l^2 l^2 \Delta \Rightarrow M \sim l^4 = V^{4/3} \quad (2.1.1)$$

Pred nama stoji izbor. Ako nam treba neka snaga (konkretna vrednost, recimo $P = 1MW$), možmo da izaberemo motor koji ima veliki momenat i malu nominalnu brzinu ili motor sa dosta manjim momentom i isto toliko većom nominalnom brzinom (odnosno $P = 1MW = M_1 \cdot \omega_1 = M_2 \cdot \omega_2$, pri čemu je $M_1 > M_2$ i $\omega_2 > \omega_1$). Kako je velicina (težina) ova dva motora, koji daju istu snagu, drastično različita mi biramo brži motor. Zbog toga se postavljaju prenosnici sa velikim prenosnim odnosom i . Za postizanje potrebne vučne snage pogodno je izabrati veću brzinu obrtanja, ali se zbog velike brzine mogu pojaviti problemi u ležištima i pri balansiranju rotora, a kod mašina za jednosmernu struju problemi mogu nastati i na komutatoru i četkicama. Zbog toga se pronalazi kompromisno rešenje. Kao visokobrzinski motori upotrebljavaju se motori naizmenične struje. Pri velikim brzinama se može pojaviti i problem prenosa preko zupčanika, svara se velika buka, pa se u pojedinim slučajevima koristi direktan pogon bez prenosnog mehanizma gde je osovina motora ujedno i pogonska osovina. Matematički iskazano, prenosnik zadovoljava zakon održanja snage (energije) ako se zanemare gubitci u njemu :

$$\begin{aligned} \omega_o &= \frac{1}{i} \omega_m & i M_o &= i M_{em} \rightarrow \\ \rightarrow M_o \omega_o &= M_{em} \omega_m \end{aligned} \quad (2.1.2)$$

gde su ω_o i ω_m ugaone brzine osovine vozila i motora, respektivno. Sa M_o i M_{em} su označeni momenti koji se javljaju na osovini vozila i motora, respektivno. Treba napomenuti da se od M_{em} (elektromagnetni momenat) treba odbiti deo mehaničkih gubitaka koji se javljaju u samom motoru da bi se dobio koristan momenat (momenat na osovini motora). Te gubitke smo u ovom slučaju zanemarili.

Primer izgleda jednog kompleksnijeg prenosnika dat je na slici



Slika 2.1.2. Mehanički prenosnik – reduktor – diferencijal

Treba napomenuti da se prenosni mehanizam generalno, kao rešenje, pokušava zaobići. Neki od razloga tome su ne tako mali gubici energije u reduktoru, dodatni deo koji može da se pokvari...

3. Pored motora i prenosnika potrebne su i pogonske osovine koje vrše mehaničko sprezanje motora, prenosnika i točkova posmatranog vozila.

Da bi se formulisali zahtevi vuče moraju se izvesti statičke i dinamičke jednačine vuče, odnosno povezivanje momenta M i ugaone brzine ω sa vučnom silom F_v , brzinom vozila v , i otporima vuče ΣF_{ot} .

2.2 Statička jednačina vučne sile

(brzina vozila je konstantna: $v = \text{const.}$)

Ugaona brzina osovine ω_o ne zavisi od gubitaka u prenosniku.

$$\omega_o = \frac{1}{i} \omega_m \quad (2.2.1)$$

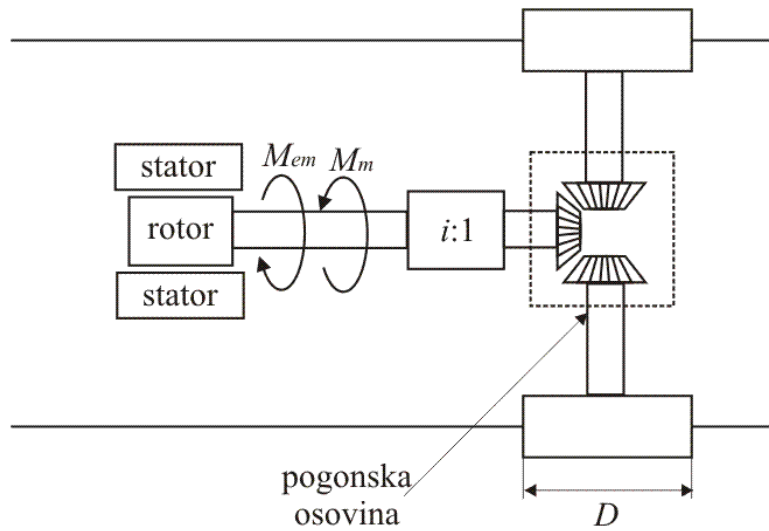
$$M_o = i \cdot M_m - M_i \quad (2.2.2)$$

Za gubitke u prenosniku uzimamo da su približno jednaki nuli. Prenosnik bi tada bio idealan. Dakle: $M_i \approx 0$. [Prelazak iz ugaonih veličina koje opisuju motor u translatorne koje opisuju kretanje vozila se može postići na sledeći način.](#)

$$F_v = \sum F_{ot} = \frac{2}{D} M_o \Rightarrow \begin{aligned} M_m &= \frac{D}{2} \frac{1}{i} F_v \\ \omega_m &= i \frac{2}{D} v \end{aligned} \quad (2.2.3)$$

3 Dinamičko ponašanje vučnog sisema

Sledeća slika prikazuje jedan vučni pogon:



Slika br.3.1. Prenos momenta motora na pogonske osovine putem reduktora i diferencijala

M_{em} je pogonski moment na izlaznoj osovini motora.

M_m je moment kojim prenosnik deluje na rotor.

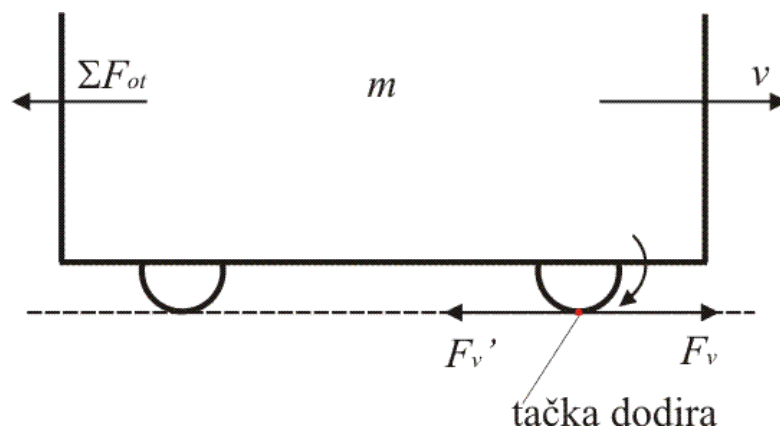
D je prečnik točka.

Može se napisati jednačina dinamičke ravnoteže:

$$J_m \frac{d\omega_m}{dt} = M_{em} - M_m \quad (3.0.1)$$

J_m je moment inercije motora, a ω_m je ugaona brzina njegovog vratila.

Posmatračemo jedno vozilo mase m , koje se kreće brzinom v i na koje deluje suma otpora pri kretanju označena sa ΣF_{ot} .



Slika br.3.2. Prikaz sila koje deluju na vozilo pri kretanju

U tački dodira točka i podloge postoje dve sile.

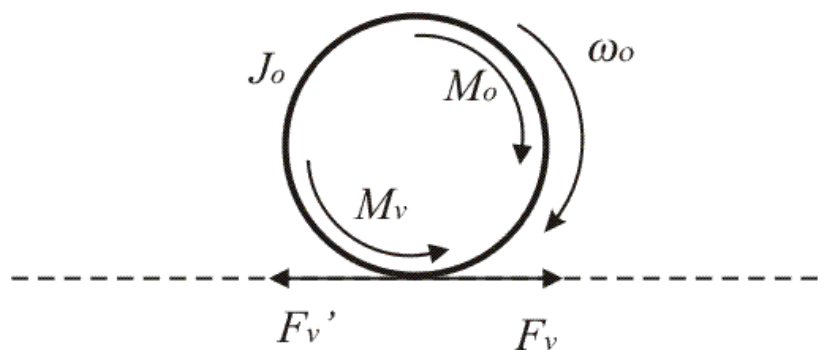
Sila F_v' je sila pogonske osovine na podlogu.

Sila F_v je suprotna sili F_v' i predstavlja dejstvo podloge na vozilo na mestu spoja podloge i točka (reakcija podloge). To je vučna sila koja pokreće vozilo.

Sledeća jednačina koja se može napisati jeste jednačina kretanja vozila:

$$m \frac{dv}{dt} = F_v - \Sigma F_{ot} \quad (3.0.2)$$

Na narednoj slici jasno su prikazani smerovi dejstva pogonskog momenta kojim prenosnik deluje na osovinu M_o i momenta M_v koji potiče od vučne sile F_v , kao i smer ugaone brzine osovine ω_o . Moment inercije J_o jeste ukupan moment inercije osovine, pogonskih točkova i svih ostalih delova koji se obrću brzinom ω_o .



Slika br.3.3. Prikaz sila (momenata) koje deluju na točak pri kretanju

Ako uzmemo da točak dodiruje podlogu u jednoj tački, tj. ako zanemarimo ugib točka, možemo napisati:

$$\omega_o = \frac{2}{D} v = \frac{\omega_m}{i} \quad (3.0.3)$$

$$M_o = i \cdot M_m \quad (3.0.4)$$

$$M_v = \frac{D}{2} F_v \quad (3.0.5)$$

Izraz (b) važi za slučaj idealnog prenosnika kod kog su zanemareni gubici.

Možemo da napišemo još jednu jednačinu dinamičke ravnoteže:

$$J_o \frac{d\omega_o}{dt} = i \cdot M_m - \frac{D}{2} F_v \quad (3.0.6)$$

Ako izraz (1) napišemo eksplicitno po M_m i zajedno sa jednakošću (a) uvrstimo u jednačinu (3), dobija se sledeća jednačina:

$$\left(J_o + i^2 J_m \right) \frac{d\omega_o}{dt} = i \cdot M_{em} - \frac{D}{2} F_v \quad (3.0.7)$$

Ako izraz (2) napišemo eksplicitno po F_v i zajedno sa jednakošću (a) uvrstimo u jednačinu (4), dobija se sledeća jednačina koja opisuje dinamiku kretanja vozila:

$$\left(m + \left(\frac{2}{D} \right)^2 J_o + \left(\frac{2}{D} \right)^2 i^2 J_m \right) \frac{dv}{dt} = \frac{2i}{D} M_{em} - \Sigma F_{ot} \quad (3.0.8)$$

Jednačina (5) se može napisati u drugačijem, skraćenom obliku:

$$m(1 + \varepsilon) \frac{dv}{dt} = \frac{2i}{D} M_{em} - \Sigma F_{ot} \quad (3.0.9)$$

Veličina ε , koja je ovom prilikom uvedena, jeste koeficijent korekcije obrtnih masa:

$$\varepsilon = \left(\frac{2}{D} \right)^2 \frac{J_o}{m} + \left(\frac{2}{D} \right)^2 i^2 \frac{J_m}{m} \quad (3.0.10)$$

Ako se izraz (6) napiše eksplicitno po M_{em} , dobija se sledeća jednakost:

$$M_{em} = \frac{D}{2i} \Sigma F_{ot} + \frac{D}{2i} m(1 + \varepsilon) \frac{dv}{dt} \quad (3.0.11)$$

U stacionarnom stanju, kada je $v = \text{const.}$, pa prema tome i $\frac{dv}{dt} = 0$, zaključuje se da je:

$$F_v = \frac{2i}{D} M_{em} \quad (3.0.12)$$

$$\omega_m = i \frac{2}{D} v \quad (3.0.13)$$

U slučaju kada brzina v nije konstantna, odnosno postoji ubrzanje ili usporenje vozila, ni izvod brzine po vremenu nije jednak nuli, pa u izrazu za M_{em} postoji desni sabirak sa desne strane znaka jednakosti, koji je različit od nule. Ovaj član izraza postoji, dakle, u tranzijentnim stanjima.

Izraz za kinetičku energiju vozila glasi:

$$W_k = \frac{1}{2} \left(m + \frac{2}{D} J_o + \frac{2}{D} i^2 J_m \right) v^2 = \frac{1}{2} (1 + \varepsilon) m \cdot v^2 \quad (3.0.14)$$

Koeficijent korekcije obrtnih masa kazuje u kojoj meri je kinetička energija u masi vozila i u koliko meri je u obrtnim delovima. Ovaj koeficijent je vrlo važna veličina. Njegove vrednosti se kreću od 0,01 u teretnoj železnici, do 0,1 u gradskom saobraćaju, kod automobila dostiže vrednosti od 0,3 do 0,4, dok kod motorcikla može dostići vrednost i do 0,8.

4 Sile koje se opiru kretanju

Sile koje se opiru kretanju predstavljaju otpor kretanju, koji se neminovno javlja pri kretanju bilo kog vozila. Otpori kretanju se mogu podeliti na sledeći način:

1. stalni otpori,
2. povremeni otpori,
3. inercijalni otpori.

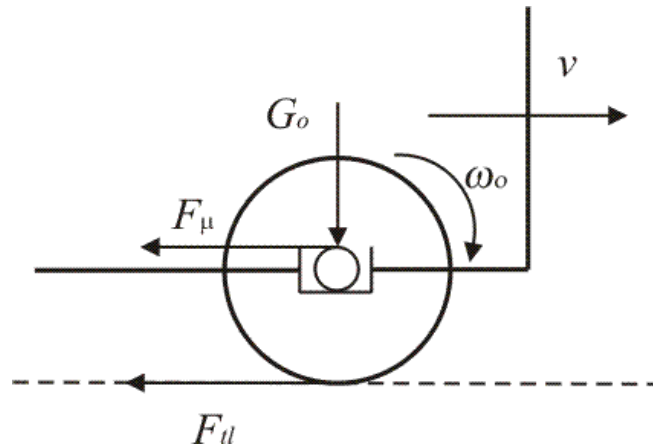
4.1 Stalni otpori kretanju

Javljaju se uvek pri kretanju vozila. Razlikujemo tri vrste ovih otpora:

- 4.1.a - trenje u ležajevima,
- 4.1.b - trenje usled kotrljanja pogonskog točka,
- 4.1.c - otpor vazduha.

4.1.a Trenje u ležajevima

U ležajevima se karoserija oslanja na osovinu.



Slika br.4.1.1. Prikaz sila (momenata) koje deluju na ležaj točaka pri kretanju

Brzina translatornog kretanja vozila označena je sa v , a ugaona brzina osovine sa ω_o .

Ukupna masa vozila označava se sa G , a izražava se u tonama $[t]$. Deo ukupne mase vozila ide na podlogu preko osovine pa se javlja osovinski pritisak G_o . Sila trenja u tački dodira je tangencijalna i ima veliku vrednost:

$$F_{\mu} = \mu \cdot G_o \quad (4.1.1)$$

Koeficijent μ je koeficijent trenja. Njegova vrednost za trenje metal - metal kreće se u opsegu 0,002 do 0,007.

Ukupan otpor kretanju usled trenja u ležaju označen je sa F_{tl} . Da bi se uticaj ovog otpora kretanju kompenzovao potrebno je da se vučna sila poveća po intenzitetu upravo za ovaj iznos.

Sila F_{tl} proporcionalna je težini vozila. Neka je r poluprečnik osovine, a R poluprečnik točka:

$$R = \frac{D}{2} \quad (4.1.2)$$

D je prečnik točka.

U praksi se odnos poluprečnika osovine i točka kreće u granicama:

$$\frac{r}{R} \approx \frac{1}{7} \div \frac{1}{15} \quad (4.1.3)$$

Izraz za silu F_{tl} glasi:

$$F_{tl} = \mu \frac{r}{R} G_o \quad (4.1.4)$$

Ovaj izraz sledi iz balansne momentne jednačine (napadna tačka je centar osovine što je istovremeno i centar točka) koja se može ustanoviti posmatranjem prethodne slike:

$$F_{tl} \cdot R = \mu \cdot G_o \cdot r \quad (4.1.5)$$

Približnim proračunom, uvažavajući praktične vrednosti za μ , r i R , dobija se da je proizvod koeficijenta trenja, poluprečnika osovine i recipročne vrednosti poluprečnika točka reda veličine 10^{-3} :

$$\mu \frac{r}{R} \approx \frac{1}{1000} \quad (4.1.6)$$

Specifični otpor (po jedinici mase) kretanju usled trenja u ležajevima:

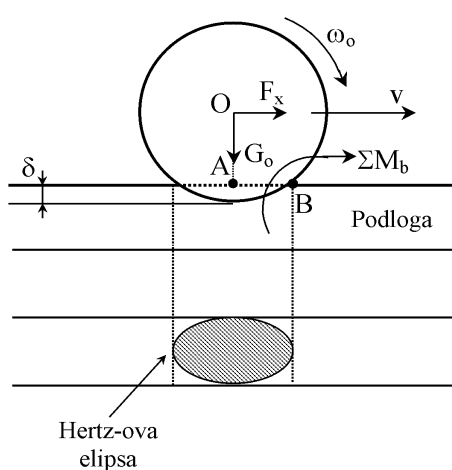
$$f_{tl} = \frac{F_{tl}}{G_o} \quad (4.1.7)$$

Ako se specifični otpor kretanju usled trenja u ležajevima izrazi u kilopondima po toni $[kp/t]$, uz uvažavanje prethodih proračuna i procena, može se ustanoviti da je:

$$f_{tl} \approx 1 \left[\frac{kp}{t} \right] \quad (4.1.8)$$

4.1.b Trenje usled kotrljanja pogonskog točka

U železnici su šine i točkovi od čelika. Mesto dodira točka i šine u praksi nije tačka, već dolazi do deformacije i točka i podloge. Ova deformacija je posledica ogromnog pritiska na mestu dodira. Utvrđeno je da se kontakt između šine i točka vrši po površi koja je oivičena tzv. Hercovom elipsom. Sve ovo je grafički prikazano na slici:



Slika br. 4.1.2. Prikaz sila (momenata) koje deluju pri kotrljanju točka po podlozi

Brzina translacionog kretanja vozila (točka) je v . Ugaona brzina osovine (točka) je ω_o . Osovinski pritisak je G_o . To je onaj deo težine vozila koji se oslanja na osovinu. Mera udubljenja, odnosno hipotetička dubina krutog točka je δ . U dodiru čelik - čelik u železnici njena vrednost je oko 1 mm. Centar osovine je O.

Zapaža se sledeće: točak kao da se nalazi u udubljenju, kao da je upao u rupu. Za njegovo pokretanje iz udubljenja potrebna je izvesna sila koja predstavlja meru otpora kretanju usled kotrljanja. Za vrednost intenziteta te sile potrebno je da se poveća vučna sila i tako će ova vrsta otpora biti savladana. Dodatnu silu, da bi se točak pokrenuo iz udubljenja, označavamo sa F_x .

Može se napisati jednačina balansa momenata za tačku B oko koje točak rotira:

$$F_x \overline{OA} = G_o \overline{AB} \quad (4.1.9)$$

Mera udubljenja δ se računa na sledeći način:

$$\delta = \frac{D}{2} - \overline{OA} = R - \overline{OA} \quad (4.1.10)$$

Zbog toga što je $\delta \ll R$, dobija se sledeće:

$$\overline{AB} = \sqrt{\overline{OB}^2 - \overline{OA}^2} = \sqrt{R^2 - (R - \delta)^2} \approx \sqrt{2R\delta} \quad (4.1.11)$$

Uzimajući i da je $\overline{OA} \approx R$, može se na osnovu balansne momentne jednačine napisati izraz za dodatnu silu F_x koja je potrebna da bi se točak pokrenuo iz udubljenja:

$$F_x = \sqrt{\frac{2\delta}{R}} G_o \quad (4.1.12)$$

Specifični otpor usled kotrljanja je:

$$f_{tk} = \frac{F_x}{G_o} = \sqrt{\frac{2\delta}{R}} \quad (4.1.13)$$

Ako se f_{tk} izrazi u [kp/t]:

$$f_{tk} = 1000 \cdot \sqrt{\frac{2\delta}{R}} \left[\frac{\text{kp}}{\text{t}} \right] \quad (4.1.14)$$

U realnim slučajevima se specifični otpor usled kotrljanja kreće u sledećim okvirima:

- železnica: $1 \div 1,2$ [kp/t]
- tramvaji i manja šinska vozila: $5 \div 7$ [kp/t]
- drumski saobraćaj: $20 \div 30$ [kp/t].

U drumskom saobraćaju, kod automobila, ugib δ je veliki jer se pneumatik više ugiba od čelika, pa je otpor usled kotrljanja veći. U železničkom saobraćaju točak stvara mali ugib, što znači da je i otpor manji pa je potrošnja električne energije po toni tereta manja. To je jedan od razloga zbog koga je železnički transport jeftin.

4.1.c Otpor vazduha

Otpor vazduha se određuje u zavisnosti od brzine kretanja i čeone površine vozila. Postoje strujnice vazduha koje obuhvataju voz. Kada su strujnice paralelne, strujanje je laminarno (fluid se kreće u slojevima oko graničnih površi. Reynolds (Re) je ispod 2000) i ono ne izaziva veliki otpor. Trenje vazduha o bočne površine je manje od otpora vazduha koji se suprotstavlja čelu i začelju voza. Pri turbulentnom kretanju vazduha (karakteriše ga haotično kretanje molekula - klistera fluida. Re je iznad 10000) javlja se kompresija na čelu i dekompresija na začelju, zbog koje se pojavljuje hlađenje na začelju. Turbulentno kretanje se javlja postepeno na određenim delovima, ne nastupa naglo sa povećanjem brzine.

Otpor vazduha zavisi od čeone površine poprečnog preseka lokomotive S [m²] i od brzine kretanja voza v [km/h]:

$$F_{ov} [\text{kp}] = k \cdot S \cdot v^2 \quad (4.1.15)$$

Koeficijent aerodinamičnosti je k i zavisi od toga koliko dobro je napravljena lokomotiva. Od njene aerodinamične linije zavisi mogućnost izbegavanja turbulencije. Koeficijent aerodinamičnosti se kreće u granicama od 1/200 do 1/2000. Otpor vazduha zavisi i od temperature i vlažnosti vazduha, ali navedena formula daje dovoljno dobre vrednosti za njegovu procenu. U železnici se smatra da do brzina od 80 [km/h] otpor vazduha praktično ne postoji. On postaje značajan pri velikim

brzinama. Pri brzinama od 250 [km/h] i većim, praktično jedini relevantan otpor je otpor vazduha.

4.2 Povremeni otpori kretanju

Javljaju se povremeno pri kretanju vozila. Posmatramo povremene otpore pri kretanju:

4.2.a) na usponu,

4.2.b) u krivini.

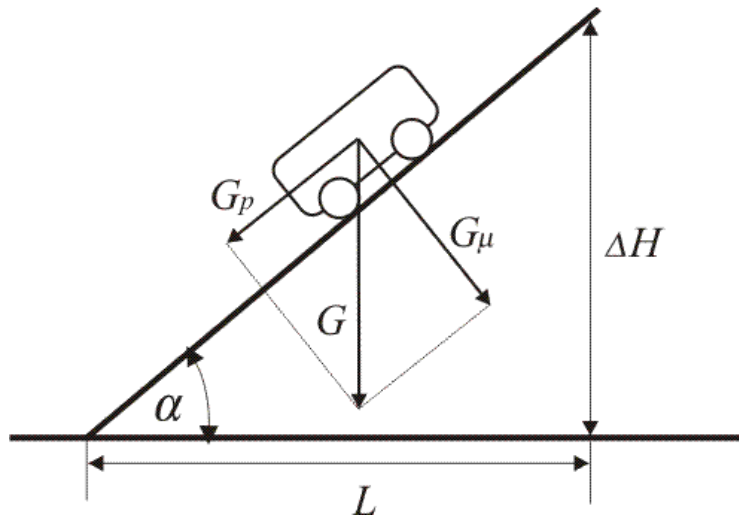
4.2.a Otpori na usponu

Ova vrsta otpora kretanju je povremena jer je trasa kretanja vozila obično povremeno na usponu.

U železničkom saobraćaju uspon se izražava u promilima [‰], dok se u drumskom saobraćaju izražava u procentima [%].

Uspón od 1 [‰] se definiše kao onaj uspon kod koga se trasa dužine 1000 [m] uspne za 1 [m].

Na slici su nacrtana dejstva pojedinih sila na vozilo koje se kreće na usponu čiji je ugao u odnosu na horizontalu α .



Slika br.4.2.1. Prikaz sila (raspodele težine vozila) koje deluju pri kretanju vozila po terenu sa nagubom

Težina vozila je G . Horizontalna komponenta težine vozila je G_p . Ova komponenta je upravo ona koja se suprotstavlja kretanju na usponu. Očigledno je, prema slici, da je:

$$G_p = G \cdot \sin \alpha \quad (4.2.1)$$

Pošto su uglovi α mali, može se vrlo približno napisati da je:

$$G_p \approx G \cdot \operatorname{tg} \alpha \text{ [rad]} \quad (4.2.2)$$

Specifična sila na usponu je:

$$f_{us} = \operatorname{tg} \alpha \quad (4.2.3)$$

Uspón se označava sa i [‰] :

$$i[\text{‰}] = 1000 \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (4.2.4)$$

Za $\Delta H=1$ [m] i $L=1000$ [m] izračunava se uspon od 1 [‰].

Specifična sila na usponu u [kp/t] jednaka je vrednosti uspona u promilima:

$$f_i \left[\frac{kp}{t} \right] = i \left[\text{‰} \right] \quad (4.2.5)$$

Sila otpora kretanju na usponu u [kp] je:

$$F_i [kp] = G [t] \cdot i \left[\text{‰} \right] \quad (4.2.6)$$

Pri kretanju vozila niz uspon potrebno je da vučni motor može da obezbedi električno kočenje. To bi bio tzv. negativan uspon.

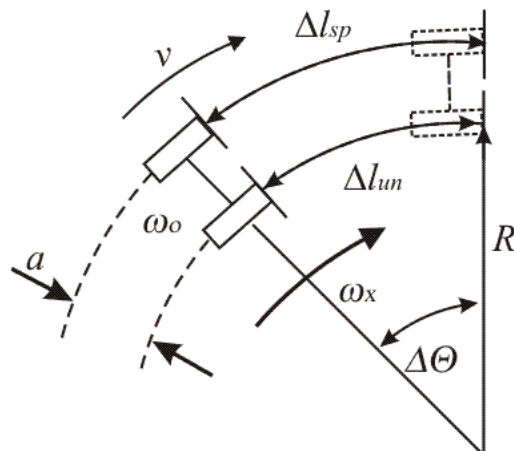
4.2.b Otpori u krivini

Postoji nekoliko razloga zbog kojih se javlja otpor kretanju kada se vozilo nalazi u krivini. Ova vrsta otpora pojavljuje se povremeno i to usled:

- 1° odsustva diferencijala (prevashodno u železnici),
- 2° paralelizma osovina (prevashodno u železnici),
- 3° centrifugalne sile.

1° Odsustvo diferencijala

Ukoliko diferencijal ne postoji točkovi su kruto vezani. Zbog toga je ugaona brzina obrtanja oba točka na istoj osovini ista.



Slika br.4.2.2. Odsustvo diferencijala u prenosnom mehanizmu uzrokuje razliku u pređenom putu dva točka na istoj osovinu u krivinama. To dovodi do proklizavanja jednog od točkova.

Na slici je prikazana krivina i dva točka, spoljašnji i unutrašnji, koji su kruto vezani. Posmatračemo ugao krivine $\Delta\Theta$. Točkovi prelaze različite puteve, što se jasno vidi iz sledećih jednačina:

$$\Delta l_{sp} = (R + a) \Delta \Theta \quad (4.2.7)$$

$$\Delta l_{un} = R \cdot \Delta \Theta \quad (4.2.8)$$

Pošto su ugaone brzine točkova na istoj osovinu iste:

$$\omega_{osp} = \omega_{oun} \quad (4.2.9)$$

i pošto točkovi prelaze različite puteve, zaključuje se da će doći do klizanja - jedan točak može da kliza unapred ili drugi unazad, a mogu da klizaju oba istovremeno što zavisi od stanja šina, od njihove "podmazanosti".

Pretpostavićemo da točak na unutrašnjoj šini ne kliza. Tada je brzina njegovog translatornog kretanja v , a ugaona brzina obrtanja:

$$\omega_{oun} = \omega_o = \frac{2}{D} v \quad (4.2.10)$$

gde je D prečnik točka.

Ugaona brzina rotacije osovine oko centra rotacije je:

$$\omega_x = \frac{v}{R} \quad (4.2.11)$$

Brzina translatornog kretanja spoljašnjeg točka:

$$v_{sp} = \omega_x (R + a) = v \left(1 + \frac{a}{R} \right) \quad (4.2.12)$$

Njegova ugaona brzina obrtanja ako ne bi bilo proklizavanja bi bila:

$$\omega_{ospx} = \frac{2}{D} v_{sp} = \frac{2}{D} v \left(1 + \frac{a}{R} \right) = \frac{2}{D} v + \frac{2}{D} v \frac{a}{R} = \frac{2}{D} v + \frac{2}{D} \Delta v = \omega_o + \Delta \omega_{sp} \quad (4.2.13)$$

Iz poslednje jednačine dobija se Δv - translatorsna brzina proklizavanja spoljašnjeg točka u odnosu na podlogu.

Ako je G_o masa vozila na osovinu (G_o se ravnomerno raspodeljuje između oba točka), a μ koeficijent trenja, sila trenja usled klizanja između spoljašnjeg točka i šine će biti:

$$F_{\mu} = \mu \frac{G_o}{2} \quad (4.2.14)$$

Gubici snage usled trenja su:

$$P = \mu \frac{G_o}{2} \Delta v \quad (4.2.15)$$

Sila otpora u odsustvu diferencijatora:

$$F_{od} = \frac{P}{v} = \mu \frac{G_o}{2} \cdot \frac{a}{R} \quad (4.2.16)$$

Specifična sila otpora je:

$$f_{od} = \frac{F_{od}}{G_o} = \frac{\mu}{2} \cdot \frac{a}{R} \quad (4.2.17)$$

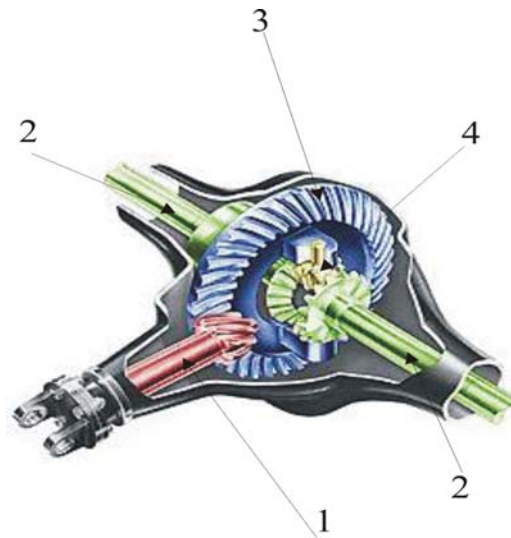
Da bi se sprečilo usporavanje i zaustavljanje voza vučnoj sili po intenzitetu treba dodati upravo vrednost ove sile otpora u odsustvu diferencijatora.

Sila otpora je obrnuto srazmerna poluprečniku krivine R . Znači, što je krivina veća, njen poluprečnik je manji pa je i sila otpora veća. Zbog toga se u železnici vrlo retko prave pruge sa poluprečnikom krivine manjim od $700 \div 1000$ [m]

Diferencijal je sklop zupčanika koji služe da raspodele brzinu obrtanja pogonske osovine na osovine točkova. I ako je brzina raspodeljena na levi i desni točak neravnomerno, zbir brzina okretanja levog i desnog točka, podeljeno sa dva, mora biti jednaka brzini obrtanja pogonske osovine. To je i iskazano sledećom jednačinom:

$$\frac{\omega_l + \omega_d}{2} = i \cdot \omega_m = \omega_o \quad (4.2.18)$$

Na sledećoj slici se mogu uočiti osnovni delovi diferencijala kakav se može naći u današnjim putničkim vozilima. Sa 1 je označena pogonska osovina, sa 2 osovine točkova, tj. poluosovine a sa 3 “tanjirasto konusni” zupčanik. Na ovoj slici se mogu uočiti i mali zupčanici označeni sa 4 koji i predstavljaju “mozak” diferencijala. Naime oni služe da u slučaju potrebe da se pogonski točkovi vozila okreću različitom brzinom tu razliku kompenzuju svojim pokretanjem. Inače kada nema potrebe za tim oni nemaju nikakvu funkciju i ne okreću se.

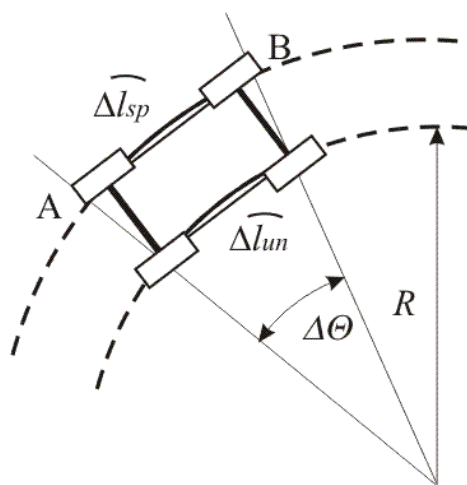


slika br.4.2.3. Mehanički prenosnik – reduktor – diferencijal

2° Paralelizam osovina

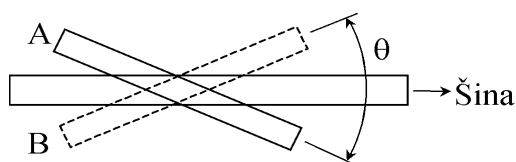
Kod svih vagona osovine su učvršćene tako da su međusobno paralelne i kruto su vezane za sanduk vagona. Kod lokomotiva mogu da postoje obrtna postolja i tada ova vrsta krute veze ne postoji.

Zbog toga, pri ulasku u krivinu, točkovi, osovine i sam vagon su postavljeni kao na slici:



Slika br.4.2.4. Problemi u krivini se javljaju i ako su osovine kruto spregnute, tj. ako ne mogu menjati svoj položaj u odnosu na vozilo – takozvani paralelizam osovina

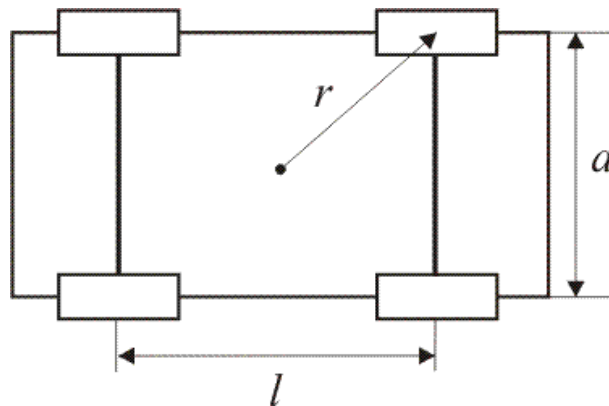
Ovakva pozicija točkova otežava kretanje, jer pri okretanju vagona u krivini dolazi do lateralnog trenja (klizanje sa strane). Trenje je na neki način zavisno od ugla između unutrašnjih točkova Θ . Da bi se ovo ocenilo posmatraćemo šta bi se dešavalo na jednoj potpunoj kružnoj deonici pruge. Zamislimo da vagon pređe potpun krug. Pošto bandaž u ovakvom trenju ne igra nikakvu ulogu, zamislićemo da ga nema. Jedinu ulogu ovde igra trenje između dodirnih površina šine i točka. Zbog toga, put vagona na potpuno kružnoj deonici se može ekvivalentirati na taj način što se posmatra vagon postavljen na ravnu čeličnu ploču, i on zarotira za ugao 2π . Sa aspekta trenja dobija se potpuno isti efekat. Kada zadnja osovina dođe u položaj prednje (iz položaja A u položaj B), što je prikazano na narednoj slici, vidi se da točak promeni svoj položaj u odnosu na šinu za ugao Θ .



Slika br.4.2.5. Položaj točka na početku krivine (položaj A) i na kraju krivine (položaj B).

Točak se, dakle, transversalno zaokrene za ugao θ . Javlja se sila trenja koja vrši rad. Kada bi osovina prešla punu kružnu putanju, promena položaja točka u odnosu na šinu bila bi 2π .

Vagon koji rotira prikazan je na slici:



Slika br.4.2.6.

Prostim razmatranjem utvrđuje se poluprečnik kružne putanje kojom bi vagon rotirao:

$$r = \frac{1}{2} \sqrt{l^2 + a^2} \quad (4.2.19)$$

Put koji pređe jedan točak iznosi: $\Delta L = 2\pi \cdot r$

Rad na savlađivanju sila trenja koji se izvrši pri rotaciji točka oko ose vagona iznosi:

$$A = 2\pi r \frac{G}{4} \mu \cdot 4 = 2\pi \cdot r \mu \cdot G \quad (4.2.20)$$

Pri kretanju vagona po kružnoj putanji izvrši se isti rad. On je, konačno, jednak radu sile trenja usled paralelnih osovina na putanji $2\pi R$:

$$A = F_{po} \cdot \Delta L_k \quad (4.2.21)$$

gde je :

$$\Delta L_k = 2\pi \cdot R \quad (4.2.22)$$

$$A = F_{po} 2\pi \cdot R = \mu G 2\pi \cdot r \quad (4.2.23)$$

Odavde sledi izraz za silu trenja usled paralelnih osovina:

$$F_{po} = \mu \cdot G \frac{r}{R} \quad (4.2.24)$$

$$F_{po} = \mu \cdot G \frac{\sqrt{l^2 + a^2}}{2R} \quad (4.2.25)$$

Potrebno je, dakle, da se vučna sila uveća po intenzitetu za ovu vrednost F_{po} da bi se savladala sila otpora kretanju usled paralelnih osovina.

Specifična sila otpora usled paralelnih osovina iznosi:

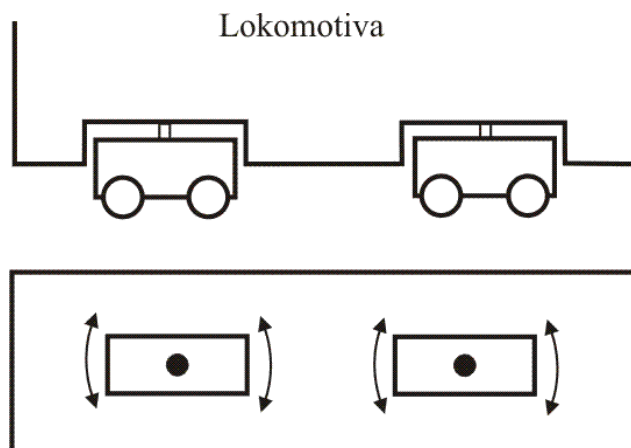
$$f_{po} = \frac{F_{po}}{G} = \mu \frac{\sqrt{l^2 + a^2}}{2R} \quad (4.2.26)$$

U praksi je odnos dimenzija $l \gg a$, pa se gornji izraz uprošćava:

$$f_{po} \approx \frac{\mu}{2} \cdot \frac{l}{R} \quad (4.2.27)$$

Sila otpora F_{po} zavisi od težine vagona: za veće težine sila je veća. Lokomotiva je teža od vagona. Najčešće se njene osovine ugrađuju tako da ugao između njih može da se menja.

Da bi se izbegao paralelizam osovina one se montiraju na obrtna postolja, kao na slici:

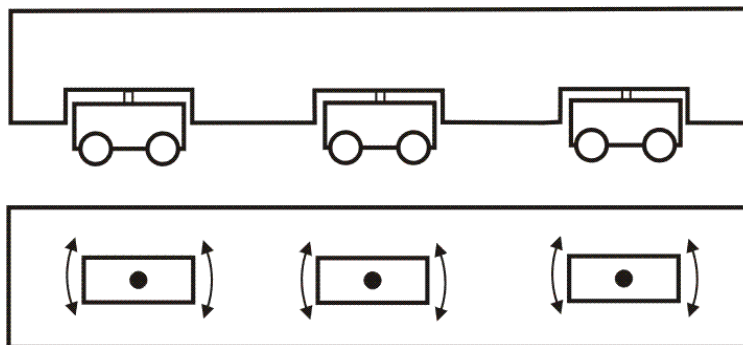


Slika br.4.2.7. Prikaz koncepta obrtnih postolja čime se izbegavaju gubici usled paralizma osovima

Monomotorno obrtno postolje ima jedan motor i više osovina. Uvode se sledeće oznake lokomotiva:

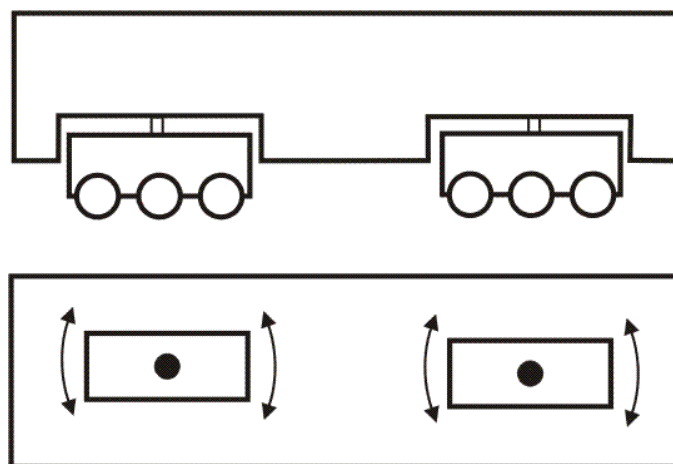
- B - na lokomotivi se nalazi monomotorno obrtno postolje sa 2 osovine,
- C - na lokomotivi se nalazi monomotorno obrtno postolje sa 3 osovine.

Lokomotiva sa oznakom BBB prikazana je na slici:



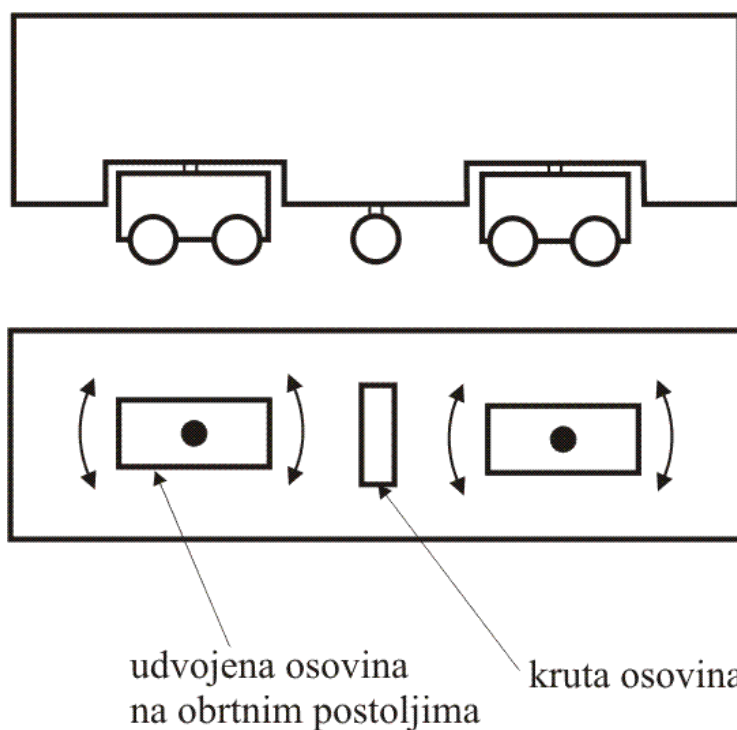
Slika br.4.2.8. Vozilo sa 3 obrtna postolja sa i po dve osovine na svakom od njih

Lokomotiva sa oznakom CC:



Slika br.4.2.9. Vozilo sa 2 obrtna postolja i sa po tri osovine na svakom postolju

Sledećom slikom je prikazana lokomotiva koja pored dva monomotorna obrtna postolja ima i osovinu koja nije pokretačka. Ovaj slučaj je vrlo redak u praksi. Oznaka je BoB.



Slika br.4.2.10. Vozilo sa 2 obrtna postolja i jednom nepogonskom osovinom

Na čelu lokomotive postoji oznaka koja se sastoji od tri cifre. Prva cifra kazuje na koji način se ostvaruje vuča i može da bude:

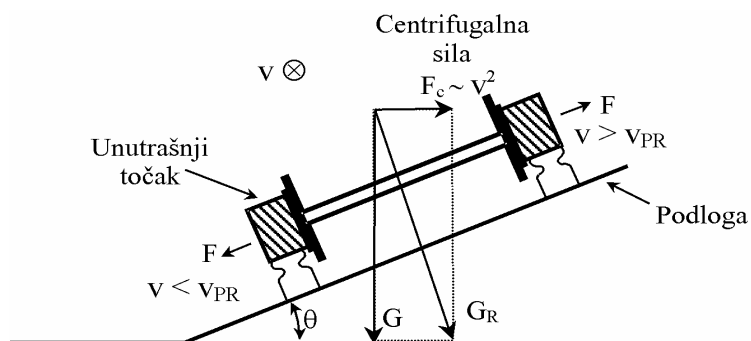
- 4 - električna vuča
- 6 - dizel lokomotiva
- 7 - dizel hidraulična vuča.

Druga cifra govori o broju vučnih motora

Treća cifra je oznaka sigurnosnog kvaliteta (ovde najviši nivo sigurnosti ima oznaku 6). (Lokomotiva "Plavog voza", koji poseduje dizel električnu vuču sa 6 motora, ima oznaku 666.)

3° Centrifugalna sila

Usled centrifugalne sile pojavljuje se još jedna vrsta povremenih otpora kretanju u krivini zbog trenja između bandaža i šina. Taj slučaj prikazan je na slici:



Slika br.4.2.11. Uticaj centrifugalne sile, koja deluje na vozilo koje je u krivini, na vučnu silu potrebnu vozilu

Vektori sile, koje su označene sa F_c , G i G_R polaze iz tačke koja predstavlja težište vagona (ili lokomotive).

F_c je centrifugalna sila i srazmerna je kvadratu brzine kretanja v , čiji je smer označen na slici.

Tangens nagiba pruge u krivini treba da bude obrnuto proporcionalan poluprečniku krivine R da bi postojala normalna sila koja deluje na podlogu.

$$\operatorname{tg}\Theta = \frac{F_c}{G} = \frac{k}{R} \quad (4.2.28)$$

Potrebno je da voz ostane u stabilnom stanju. Sila G_R je normalna na podlogu samo u slučaju jedne brzine za koju je trasa krivine projektovana v_{PR} . Za slučajeve drugih brzina, pojaviće se sila koja će težiti da bočno pomeri vagon (ili lokomotivu). Na slici je prikazan smer te sile za slučajeve kad je brzina kretanja veća i manja od brzine za koju je trasa krivine projektovana. Vertikalne površine točka (bandaži) naslanjaju se tada bočno na šine što izaziva trenje, koje predstavlja otpor kretanju. Da bi se ovaj otpor savladao, vučnoj sili se dodaje po intenzitetu vrednost opisane sile trenja.

Za Jugoslovenske železnice se aproksimativno uzima da je specifični otpor kretanju u krivini:

$$f_{kr} = \frac{650}{R [m] - 55} \left[\frac{kp}{t} \right] \quad (4.2.29)$$

gde je R poluprečnik krivine.

4.3 Inercijalni otpori kretanju

Inercijalni otpor kretanju predstavlja silu koja je potrebna da bi vozilo ubrzavalo ubrzanjem a .

$$F_i [N] = m [kg] (1 + \varepsilon) a \quad (4.3.1)$$

gde je a označeno translatorno ubrzanje, a ε koeficijent korekcije obrtnih masa.

$$F_i[\text{kp}] = 102(1 + \varepsilon)G[\text{t}]a\left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right] \quad , \quad 102 = \frac{1000}{g} \quad , \quad g = 9,81\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad (4.3.2)$$

Iz poslednje jednačine sledi izraz za specifičnu silu:

$$f_i \left[\frac{\text{kp}}{\text{t}} \right] = 102(1 + \varepsilon)a \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \quad (4.3.3)$$

5 Opšta jednačina vuče

Ako se svi otpori kretanju uračunaju u opštu jednačinu vuče dobija se:

$$F_v[\text{kp}] = [f_{tl} + f_{tk} + 102(1 + \varepsilon)a \pm i + f_{kr}](G_a + G_v) + F_{ov} \leq \xi G_a \quad (5.0.1)$$

f_{tl} - usled trenja u ležajevima

f_{tk} - usled otpora kotrljanja

f_{kr} - zbog otpora u krivini

ε - koeficijent korekcije masa

ξ - koeficijent adhezije

i - uspon (pad)

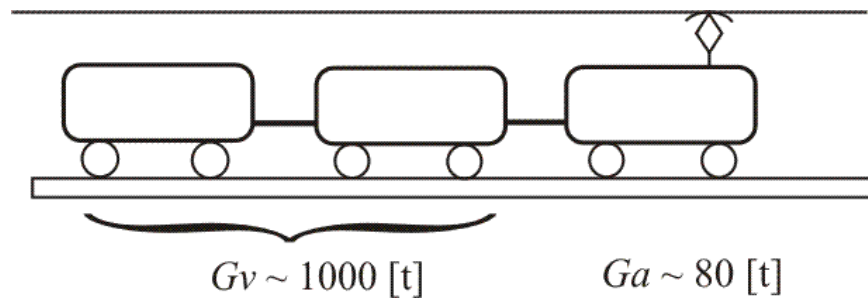
F_{ov} - zbog otpora vazduha

G_a - adheziona težina (onaj deo težine vozila koji se oslanja na pogonske točkove; vrlo bitna veličina jer joj je srazmerna vučna sila; kod lokomotive sve osovine su pogonske tako da je težina lokomotive jednaka adhezionoj težini $G_a = G_L$;

kod automobila postoji jedna pogonska osovina; maksimalna vučna sila ograničena je adhezijom težinom pre proklizavanja vozila)

G_v - težina tereta

$G_a + G_v$ - ukupna težina voza (pogledati sledeću sliku)



Slika br.5.1. Prikaz adhezione težine jedne kompozicije – nju predstavlja težina lokomotive

Sve ovo bitno je za procenu vučnih zahteva.

U Jugoslovenskim železnicama važe sledeće jednačine kojim se formulišu određene veličine:

- suma svih specifičnih otpora kretanju:

$$\Sigma f_{ot} = 2 + m \left(\frac{v}{10} \right)^2 \left[\frac{kp}{t} \right], \quad \text{brzina je u [km/h]}. \quad (5.0.2)$$

$m = 0.02 \div 0.1$, u zavisnosti od toga da li se radi o putničkim ili teretnim vozovima

Za brzinu od 60 [km/h] procenjuje se $\Sigma f_{ot} \sim 2 \div 3 \left[\frac{kp}{t} \right]$ (5.0.3)

- vučna snaga po jedinici težine je:

$$p = \frac{P_v}{G} \sim 1 \left[\frac{kW}{t} \right] \quad (5.0.4)$$

Za tramvaj važi:

- suma svih specifičnih otpora kretanju, pri polasku:

$$\Sigma f_{ot} = 12,5 \left[\frac{kp}{t} \right] \quad (5.0.5)$$

- vučna snaga po jedinici težine je:

$$p \left(60 \left[\frac{km}{h} \right] \right) \sim 6,2 \left[\frac{kW}{t} \right], \quad p \left(80 \left[\frac{km}{h} \right] \right) \sim 12 \left[\frac{kW}{t} \right] \quad (5.0.6)$$

U tramvajskom saobraćaju lošije su šine nego u železničkom, i manji je prečnik točkova, tako da su otpori kretanju veći.

Težina tramvaja je oko 20 do 40 [t], znači potrebna vučna snaga je nekoliko stotina [kW].

Za trolejbus se procenjuju sledeće vrednosti:

- suma svih specifičnih otpora kretanju:

$$\Sigma f_{ot} \sim 20 \left[\frac{kp}{t} \right]$$

- vučna snaga po jedinici težine je:

$$p \sim 10 \div 30 \left[\frac{kW}{t} \right]$$

Za automobil Yugo 45, nakon istraživanja, dobijeno je:

$$F_{ot} = 200 + 0,028 \cdot v^2, \quad \text{brzina je u } [km/h] \quad (5.0.7)$$

Procenjuje se da je za vozilo lakše od 1[t] suma otpora kretanju oko 20 [kp]. Zbog pneumatika ugib je veći pa je i suma otpora kretanju veća.

Specifična utrošena električna energija po 1 [t] i po 1 [km] pokazuje koliko je potrebno energije za prenos 1 [t] na 1 [km], i za pojedina vozila iznosi:

$$\text{- teretni voz} \quad 12 \div 20 \left[\frac{Wh}{kmt} \right] \quad (5.0.8)$$

$$\text{- putnički voz} \quad 20 \div 30 \left[\frac{Wh}{kmt} \right] \quad (5.0.9)$$

$$\text{- metro, tramvaj} \quad 40 \div 50 \left[\frac{Wh}{kmt} \right] \quad (5.0.10)$$

$$\text{- Yugo 45} \quad 100 \div 150 \left[\frac{Wh}{kmt} \right] \quad (5.0.11)$$

Zašto je teško napraviti autonomni električni automobil i kakva su alternativna rešenja?

Uzmimo da je njegova masa oko 1 [t]. Potrebno je oko $E=15000$ [Wh] električne energije za prelazak 100 [km]. Jedan klasičan akumulator ima masu oko 10 [kg] i daje 55 [Ah]· 12 [V] = 600 [VAh]. Odavde sledi da je potrebno dvadesetak akumulatora što predstavlja veliku masu za jedno takvo vozilo. Zbog ovakvih problema jedno od ponuđenih rešenja autonomnog vozila jeste hibridni kocept. Električni i SUS agregat u jednom vozilu. Prednosti ovakvog rešenja se ogleda u dislokaciji emisije izduvnih gasova jer se pri gradskoj vožnji (sporija sa čestim stajanjima) može koristiti električni pogon, dok kad baterije “presuše” automatski startuje SUS motor.

Tehnička usavršavanja tracionih baterija dovode do toga da je sada moguće smestiti više energije u akumulator iste težina nego što je to bilo moguće ranije. Nažalost, akumulatori su i dalje preteški za masovniju primenu čisto električnog pogona u vozilima.

6 Formulacija vučnih zahteva

Poći ćemo od poznatih konstatacija: vučnoj sili i translatornoj brzini analogni su momenat i ugaona brzina.

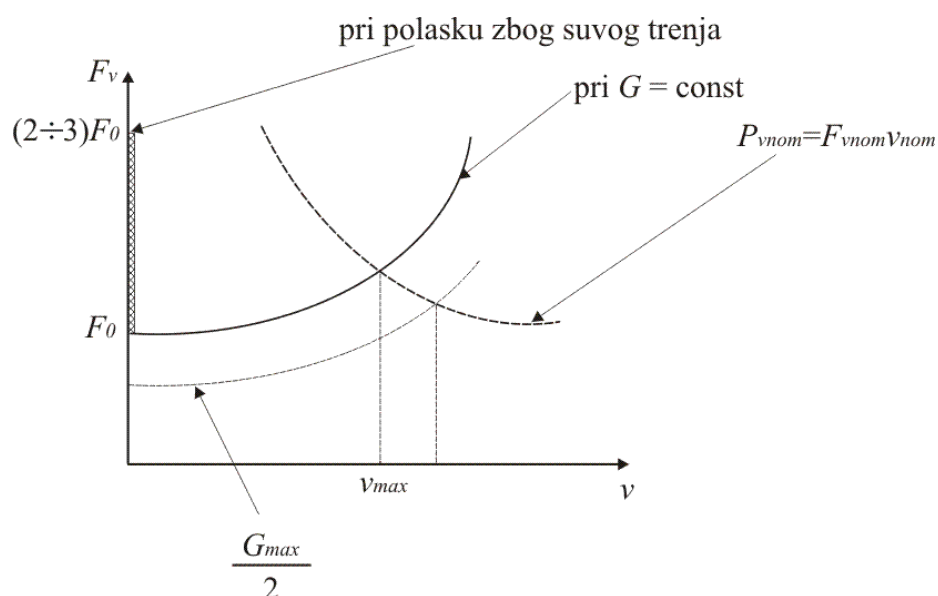
Poznati izrazi za ugaonu brzinu i momenat su:

$$\omega_m = \frac{2 \cdot i}{D} v \quad (6.0.1)$$

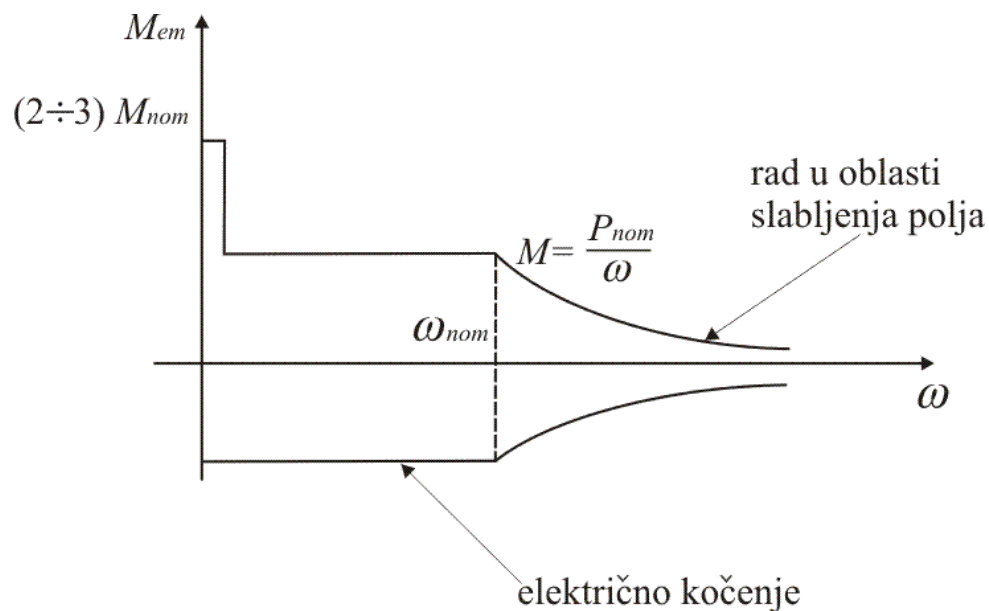
$$M_m = \frac{D}{2 \cdot i} F_v \quad (6.0.2)$$

Postavlja se pitanje kakvu eksploatacionu karakteristiku vučni motor treba da obezbedi?

Grafići zavisnosti vučne sile od brzine, odnosno momenta od ugaone brzine, dati su na sledećim slikama:



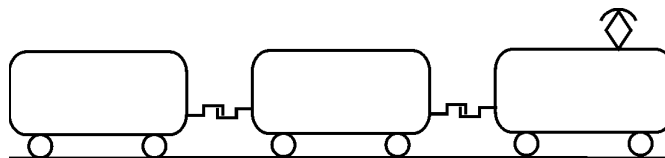
Slika br.6.1. Prikaz opozitnih zahteva na F - v dijagramu : želimo da imamo konstantnu snagu (uslovljava motor) i da se možemo kretati brzinama koje leže u širokom opsegu



Slika br.6.2. Zavisnost momenta motora od ugaone brzine osovine motora. Nije mehanička karakteristika.

Pik na karakteristici je prouzrokovan potrebom da se savlada suvo trenje i natezanje kvačila, pri polasku. To je tzv. statičko trenje.

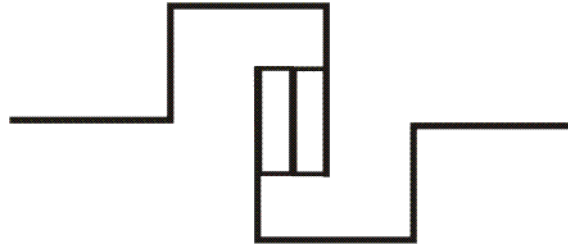
Položaj kvačila na jednom vozu prikazan je na slici:



Slika br.6.3. Položaj kvačila prilikom polaska kompozicije utiče dosta na vrednost potrebnog polaznog momenta

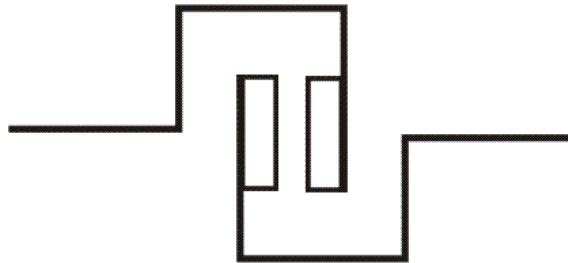
Moguća su tri položaja kvačila:

1. pri razvoju pozitivne vučne sile



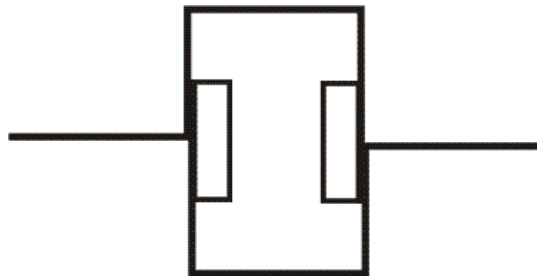
Slika br.6.3.a

2. pri kočenju



Slika br.6.3.b

3. relaksirano kvačilo (nije nategnuto) - ne prenosi se vučna sila



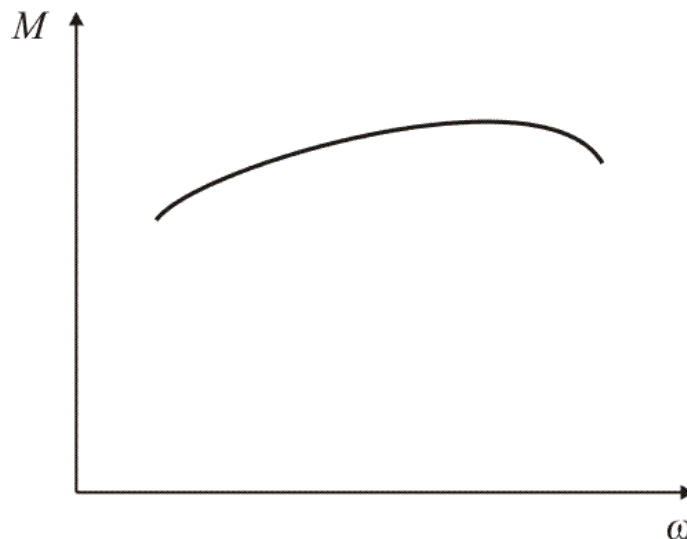
Slika br.6.3.c

Ako su kvačila pri polasku relaksirana onda lokomotiva savladava suva trenja jednog po jednog vagona. Ako su kvačila bila nategnuta, lokomotiva pri polasku mora da savlada sva suva trenja odjednom. Tada se zahteva vučna sila bar dva puta veća od nazivne. Slično važi i za kretanje unazad. Da bi se smanjilo početno opterećenje

lokomotive pri polasku, ako su kvačila bila nategnuta vrši se njihovo relaksiranje malim kretanjem unazad. Problemi mogu da nastanu i pri pogrešnom kočenju. To se vidi na primeru kretanja lokomotive unapred, a koči se poslednjim vagonom.

U osnovi svih vučnih pogona postoji ograničenje po snazi. Snaga primarnog izvora napajanja je ograničena, motori i pretvarači su za određenu snagu. Stoga bi vučni zahtev mogao da se formuliše kao zahtev za konstantnom snagom. Prirodni zahtev je zahtev za konstantnom snagom. Na većim uzbrdicama i sa teretom potrebno je ostvariti veću vučnu silu i istovremeno smanjiti brzinu. To se vidi na gornjem grafiku.

Kod motora sa unutrašnjim sagorevanjem postoji sledeća karakteristika:



Slika br.6.4. Zavisnost momenta motora od ugaone brzine osovine motora za SUS motore

Rad po obrtaju je konstantan i definisan je veličinom cilindra. Moment je manje-više konstantan.

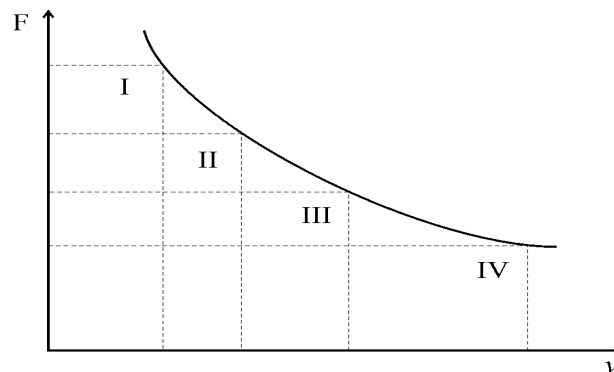
$$\frac{\Delta W}{\Delta \theta} = \text{const.} \Rightarrow M = \text{const.} \quad (6.0.3)$$

Funkcija konstantne snage se postiže pomoću varijabilnog prenosnika - menjača. Jednačine za vučnu silu i brzinu su:

$$F_v = \frac{2i}{D} M \quad (6.0.4)$$

$$v = \frac{D}{2i} \omega \quad (6.0.5)$$

i je prenosni odnos. Za njegove različite vrednosti, na sledećem grafiku vidi se zavisnost vučne sile od brzine.



Slika br.6.5. Modifikovana zavisnost vučne sile od brzine vozila koje pokreće SUS motor. Ovakva zavisnost se dobija pravilnim projektovanjem menjača, odnosno reduktora sa varijabilnim prenosnim odnosom

U električnoj vuči menjač se ne ugrađuje u vozila. Ovde se teži tome da pretvarač i motor obezbede u širokom opsegu režim sa konstantnom snagom (režim slabljenja polja). Pomenimo da bi izrada kvačila za menjač nekog teretnog voza bio zaista izazovan (praktično neizvodljiv) inženjerski poduhvat.

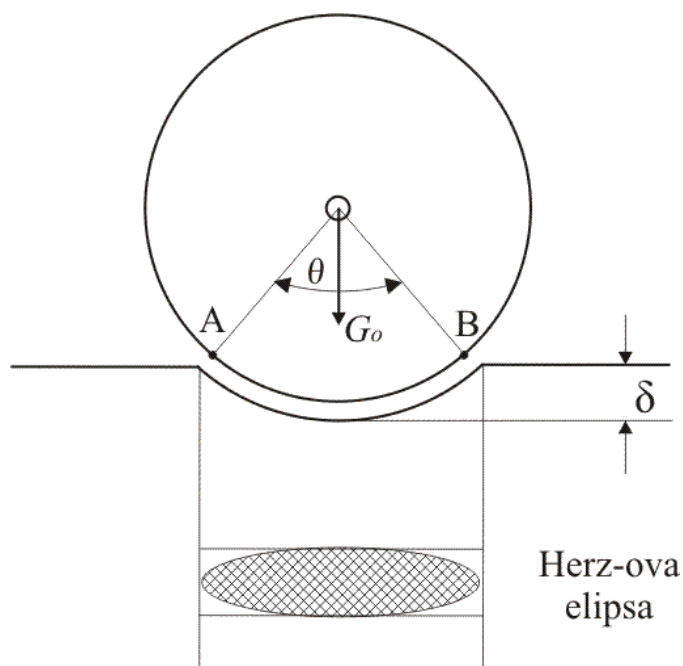
7 Adhezija

Pred nama se nalazi važno pitanje: kako se ostvaruje vučna sila na kontaktu između točka i podloge?

Za realizovanje pokretačke sile potreban je spoj između šine i točka. Takva veza šine i točka naziva se adhezija.

Šina i točak nisu idealno kruta tela. Njihov međusobni dodir nije tačka. Pod vertikalnim dejstvom težine vozila dolazi do elastične deformacije tako da se kontakt između šine i točka vrši po eliptičnoj, tzv. Hertz-ovoj površini. Nastaje praktično utapanje točka u podlogu.

Na sledecoj slici prikazan je slučaj ako osovina nije pogonska, tj. ako je vučna sila na toj osovini jednaka nuli: $F_v=0$.



Slika br.7.1. Prikaz kontakta točak – podloga za točak koji nije pogonski

Vrednost rastojanja od tačke A do tačke B je:

$$\overline{AB} = \frac{D}{2} \theta = R \cdot \theta \quad (7.0.1)$$

D je prečnik točka a R njegov poluprečnik; θ je ugao između poluprečnika $\overline{OA}$ i $\overline{OB}$.

Znači, za slučaj kada je $F_v=0$ dobija se da tačka na obodu točka prelazi put između A i B:

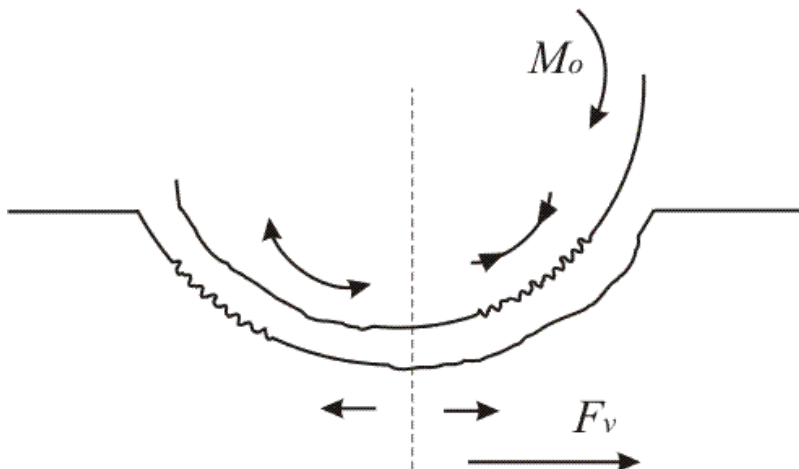
$$l = R \cdot \theta \quad (7.0.2)$$

i da je periferna brzina te tačke:

$$\dot{l} = v = R \cdot \omega_o \quad (7.0.3)$$

jednaka translatornoj brzini kretanja. Poznato je da je ω_o ugaona brzina osovine.

U slučaju pokretačke osovine postoji delovanje pokretačkog momenta M_o i dolazi do uzdužnog naprezanja površi koje se dodiruju. To ilustruje sledeća slika:



Slika br.7.2. Prikaz kontakta točak – podloga za točak koji jeste pogonski. U površinskim slojevima dolazi do deformacija.

Može se zapaziti kod točka da se u jednom slučaju deo obima točka razvlači (npr. 1 [cm] se razvlači na 1,1 [cm]), a u drugom se sabija (npr. 1 [cm] obima se sabija na 0.9 [cm]). Kod podloge se događa ista stvar, samo što je obrnuto. Ako vučna sila promeni smer ovo se menja u suprotnu stranu. Zapaža se da deo točka ne naleće

uvek na podlogu istog oblika trase. Dolazi do gužvanja podloge i ne dolazi do klizanja.

Kada točak pokuša da se zarotira pod dejstvom pogonskog momenta prenetog sa osovine, dolazi do deformacija i točka i podloge. Te deformacije su najuočljivije u površinskim slojevima. One, na neki način, akumuliraju energiju koju im prenosi motor. Ako je vučna sila F_v , koja je potrebna da vozilo savlada otpore kretanja, suviše velika tako da nastupe plastične deformacije dolazi do proklizavanja. To znači da mi ne smemo preneti suviše veliku silu na kontakt točak-podloga, i ako za to možda imamo uslova (jaki motori), jer nam pretilo proklizavanje. Ako je sila F_v , koja je potrebna da telo savlada otpore kretanja, dovoljno velika da savlada otpore kretanja a da istovremeno i ne izazove plastične deformacije već samo elastične, dolazi do kretanja vozila.

Kada je $F_v > 0$, deo obima točka naleće na kraći deo trase i tada će biti:

$$v < R\omega_o \quad (7.0.4)$$

U slučaju $F_v < 0$, deo obima točka naleće na duži deo trase i tada je:

$$v > R\omega_o \quad (7.0.5)$$

Znači, brzina kretanja se razlikuje od periferne brzine, ali ne dolazi do klizanja jer postoje uzdužne deformacije. Ovakva razlika ovih brzina se naziva pseudoklizanje i označava se sa v_k .

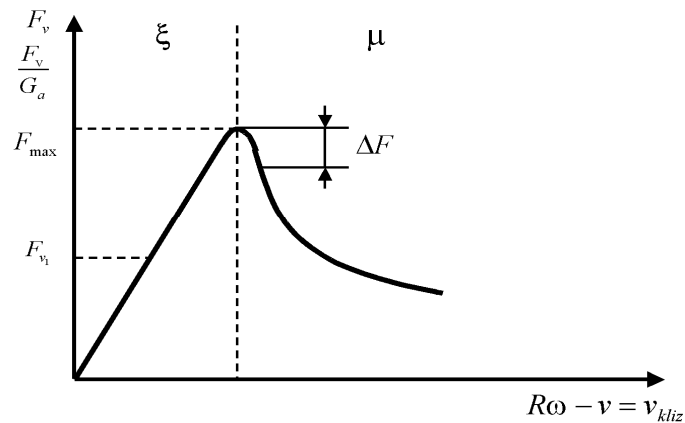
$$v_k = \omega_o R - v \quad (7.0.6)$$

U praksi vrednost pseudoklizanja iznosi oko 1 [%].

Pseudoklizanje ima osobinu da se menja za različite vrednosti vučne sile. Ono je nula kada je vučna sila jednaka nuli. Veće je od nule kada je vučna sila veća od nule - pozitivno pseudoklizanje, a manje od nule kada se vučna sila manja od nule - negativno pseudoklizanje.

7.1 Adhezionna kriva

Adhezionna kriva predstavlja zavisnost vučne sile od brzine pseudoklizanja. Ona nije glatka ni linearna kao što će ovde biti prikazana:



Slika br.7.1.1. Zavisnost vučne sile od brzine klizanja

Značenje pojedinih oznaka sa grafika:

G_a - adhezionna težina

$R\omega$ - brzina pogonske osovine

v - brzina vozila

v_{kliz} - brzina pseudo klizanja

ξ - oblast nepostojanja klizanja

μ - oblast klizanja između dodirnih površina

$F_{v1} = \frac{M_{ol}}{R}$ - vučna sila u tački 1

Adhezioni koeficijent ξ opisuje onaj deo vozila koji se oslanja na pogonske osovine. On predstavlja vezu između maksimalne vučne sile i adhezione težine. Ako je

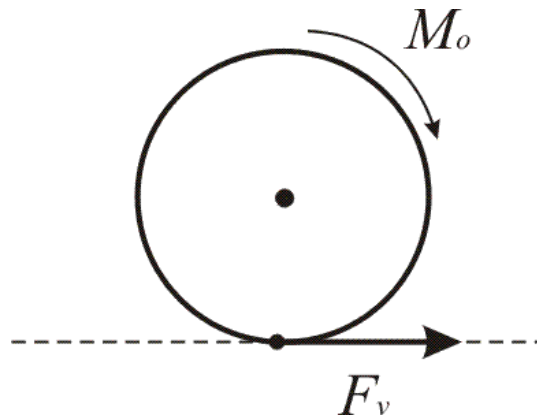
adhezijska težina nekog vozila G_a , tada je njegova maksimalna vučna sila (bez obzira na jačinu pogonskih motora):

$$F_{\max} = \xi \cdot G_a \quad (7.1.1)$$

Prevalnom tačkom na grafiku razdvajaju se dve oblasti: oblast nepostojanja klizanja i oblast klizanja između dodirnih površina. Kada se pređe prevalna tačka na grafiku, nastupa proklizavanje.

Zona nepostojanja klizanja je zona pseudoklizanja. Ukoliko se prevaziđe vučna sila $F_{\max}$ ukupno naprezanje će biti toliko da površine počinju da klizaju među sobom i vučna sila se tada ne razvija na račun adhezije već na račun trenja. Nastupa zona klizanja, odnosno zona trenja.

Analiziraće se proklizavanje u slučaju kada je moment vučnog motora konstantan ($M_o = \text{const}$):



Slika br.7.1.2. Prikaz kontakta točak – podloga

Posmatrajmo jednačinu koja pokazuje ravnotežu momenata:

$$J_o \frac{d\omega_o}{dt} = M_o - F_v R \quad (7.1.2)$$

F_v - predstavlja delovanje podloge na pogonsku osovinu.

Dok smo u oblasti adhezije (što na grafiku predstavlja, recimo tačka F_{vI}), nema klizanja, pa je vrednost momenta:

$$M_o = F_v R \quad (7.1.3)$$

Iz jednačine ravnoteže momenta vidimo da sve tačke do prevalne tačke predstavljaju stabilne ravnoteže. To znači da pri porastu ugaone brzine osovine ω_o brzina pseudoklizanja raste što uzrokuje rast vučne sile, pa se prema jednačini ravnoteže dobija da promena brzine opada, tj. brzina se vraća na vrednost pre promene:

$$\omega_o \uparrow \Rightarrow v_{kliz} \uparrow \Rightarrow F_v \uparrow \Rightarrow \Delta \omega \downarrow \quad (7.1.4)$$

Znači, pri poremećaju brzina osovine se ne menja.

Kada se dođe do vrha adhezione krive, dolazi se do tačke labilne ravnoteže. Pri porastu ω_o povećalo bi se pseudoklizanje ali bi vučna sila opala (ona stvara sada kočioni momenat) što bi dovelo do daljeg porasta ω_o , jer je :

$$J_o \frac{d\omega_o}{dt} > 0 \quad (7.1.5)$$

Slikovito prikazano:

$$\omega_o \uparrow \Rightarrow v_{kliz} \uparrow \Rightarrow F_v \downarrow (\Delta F < 0) \Rightarrow J_o \frac{d\omega_o}{dt} > 0 \quad (7.1.6)$$

Dalje se događa povećanje klizanja i nastavlja se smanjenje vučne sile, a pokretačka osovina će nastaviti da progresivno ubrzava jer koeficijent trenja μ opada sa povećanjem brzine kojom se taru dve površi. Dolazi do pojave koja se u železnici naziva boksiranje. Ukoliko bi se ovaj proces nastavio došlo bi do oštećenja ležajeva, šina i točkova. Opasnost od svega ovoga dominira na nizbrdici kad je $F_v < 0$, a ne pri polasku. Rizik da se ovo dogodi je mali zahvaljujući tome što i vagoni mogu da koče pa je karakteristika kočenja bolja.

Da bi se izbeglo labilno stanje u F_{max} potrebno je uvesti pogon sa tvrdom mehaničkom karakteristikom.

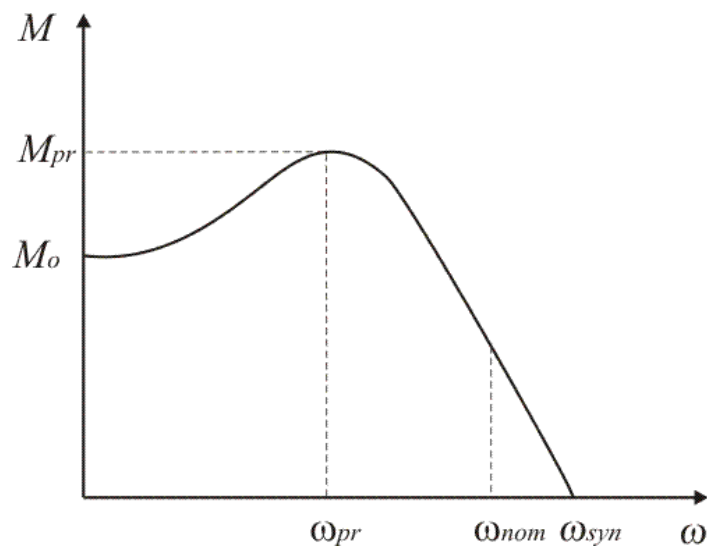
Prethodno će se definisati mehanička karakteristika vučnog motora kao zavisnost momenta od brzine kojom se motor obrće u stacionarnom stanju (nema prelaznih pojava u električnom podsistemu motora).

Mehanički podsistem: varijable i parametri, momenti inercije i mase, gde se akumulira kinetička energija vozila; takođe i pozicija.

Električni podsistem: struje, fluksevi, polja, naponi - veličine stanja ovog podsistema.

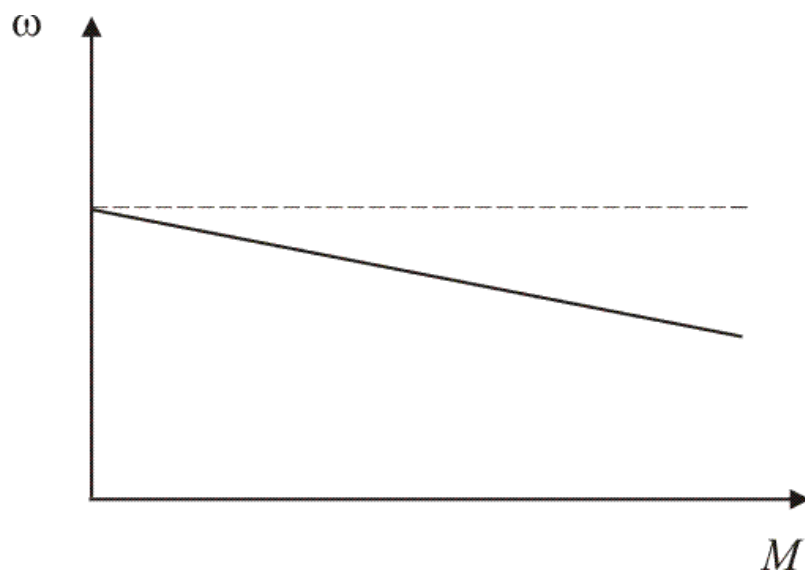
Na sledećim slikama su prikazane mehaničke karakteristike pojedinih tipova vučnih motora.

Asinhroni motor:



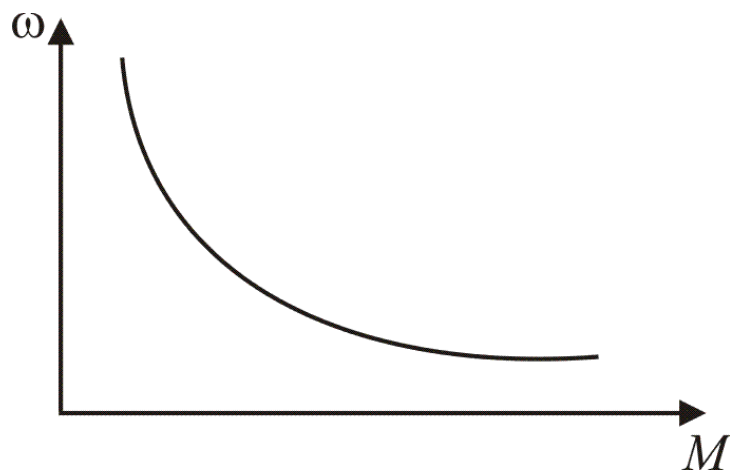
Slika br.7.1.3. Mehanička karakteristika asinhronog motora u I kvadrantu

Motor jednosmerne struje sa nezavisnom pobudom (tvrda mehanička karakteristika - velika je strmina):



Slika br.7.1.4. Mehanička karakteristika jednosmernog motora sa nezavisnom pobudom u I kvadrantu

Redni motor jednosmerne struje (ima hiperboličnu karakteristiku; ona je meka jer je strmina mala):



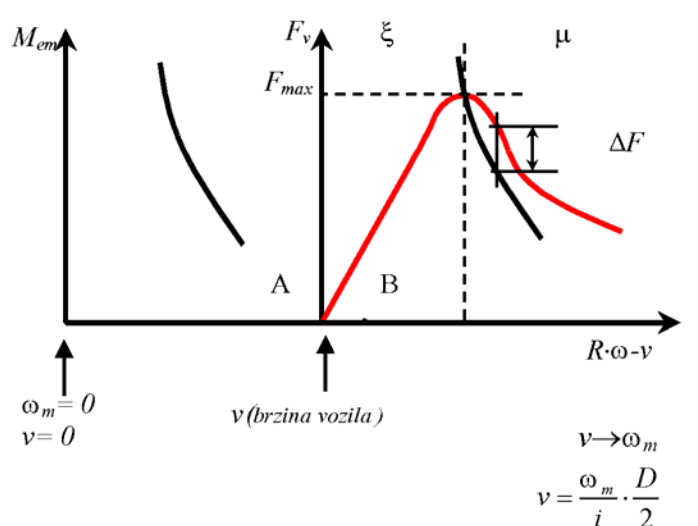
Slika br.7.1.5. Mehanička karakteristika jednosmernog motora sa rednom pobudom u I kvadrantu

Pred nama se nalazi mehanička karakteristika odabranog motora i atheziona kriva. Potrebno je pravilno izvršiti njihov presek i zadržati ravnotežno stanje.

Opasnost od proklizavanja se može otkloniti pravilnim izborom mehaničke karakteristike.

Uvodimo, dakle, pogon sa tvrdom mehaničkom karakteristikom. Ta karakteristika preseca athezionu krivu u tački F_{max} . Time se omogućava maksimalna vučna sila.

Posmatramo grafik:



Slika br.7.1.6. Uticaj prirode mehaničke karakteristike motora (meka ili tvrda) na iskorišćenje adhezije i stabilnost

Sve veličine označene na grafiku su poznate od ranije.

Vučnu silu izražavamo poznatom relacijom:

$$F_v = \frac{2}{D} i M_{em} \quad (7.1.7)$$

gde je D prečnik točka, i prenosni odnos, a M_{em} je elektromagnetni moment motora.

Ukoliko je mehanička kriva strmija od adhezione krive odnosno, ako je:

$$-\frac{\Delta M_{em} \frac{2}{D} i}{\Delta v_k} > -\frac{\Delta F_v}{\Delta v_k} \quad (7.1.8)$$

tada ako se iz tačke gde je F_{max} brzina poveća, dolazi do smanjenja vučne sile, ali još više opada elektromagnetni moment motora, pa sledi

$$M_o - F_v R < 0 \quad (7.1.9)$$

To znači da je:

$$J_o \frac{d\omega_o}{dt} < 0 \quad (7.1.10)$$

i da, prema tome, postoji tendencija povratka na F_{max} .

U praksi je nemoguće ostvariti da budemo blizu F_{max} (recimo, $F_v=0.98F_{max}$ ili slično) u oblasti ξ zato što sila osovinskog pritiska (pritisak točkova na šine) varira (recimo, kod prelaza točkova preko spoja šina). Usled toga varira G_a pa je nemoguće održati F_v jako blizu F_{max} . Pored toga, i trenutno stanje šina u zavisnosti od atmosferskih prilika ima veliki uticaj na gore navedeno, tako da adhezioni koeficijent (između šina i točkova) može biti:

- suve čiste šine $\xi=0.38$
- vlažne čiste šine $\xi=0.25$
- vlažne prljave šine $\xi=0.18$

Od prljavštine je najkritičnije ulje (posebno u tunelima u kojima idu i dizelke). Minimalna vrednost koeficijenta adhezije može biti $\xi=0,1$. Najgora situacija je u slučaju pruge kojom ide parna, dizel i električna vuča, kroz tunel sa krivinom (u krivini je lošije naleganje točkova).

Još jedan od razloga zašto F_v ne može biti jako blizu F_{max} je i zavisnost $\xi=f(v)$:

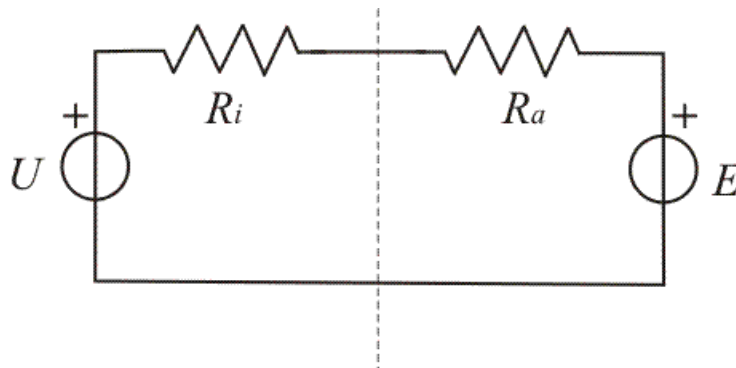
$$\xi \approx \frac{\xi_{v=0}}{1+0.015 \cdot v[km/h]} \Rightarrow v \uparrow \Rightarrow \xi \downarrow \quad (7.1.11)$$

ξ , dakle, zavisi od stanja šina i točkova. Ako je točak oštećen, osovinski pritisak varira, pa se ξ smanjuje.

Strminu mehaničke karakteristike ostvarujemo različitim elementima pogonskog sistema.

8 Uticaj elemenata elektrovučnog sistema na strminu mehaničke karakteristike

Posmatrajmo motor jednosmerne struje sa nezavisnom pobudom:



Slika br.8.1. Uprošćena zamenska šema motora jednosmerne struje sa nezavisnom pobudom napajanog iz realnog naponskog izvora

Izraz za elektromotornu silu je:

$$E = k_e \phi \cdot \omega_m \quad (8.0.1)$$

Izraz za elektromagnetni moment je:

$$M_{em} = k_m \phi I_a \quad (8.0.2)$$

Strmina mehaničke karakteristike je izvod:

$$S = \frac{\Delta M_{em}}{\Delta \omega_m} \quad (8.0.3)$$

Prema šemi može se napisati:

$$I = \frac{U_0}{R_i + R_a} - \frac{k_e \phi \omega_m}{R_i + R_a} \quad (8.0.4)$$

Za asinhroni motor izraz za strminu je:

$$S_{AM} \approx \frac{M_{pr}}{\omega_n s_{pr}} \sim \psi^2 \quad (8.0.5)$$

Ψ je fluks u zazoru, M_{pr} je prevalni momenat, s_{pr} je prevalno klizanje i ω_n je nominalna brzina.

Zamenom izraza za armaturnu struju u izraz za elektromagnetni momenat dobija se izraz za taj momenat u funkciji od ugaone brzine:

$$M_{em}(\omega_m) = k_m \phi \frac{U_0}{R_a + R_i} - \frac{k_m \phi^2 k_e}{R_a + R_i} \omega_m \quad (8.0.6)$$

Odavde sledi izraz za strminu mehaničke karakteristike:

$$\frac{\Delta M_{em}}{\Delta \omega_m} = - \frac{k_m^2 \cdot \phi^2}{R_a + R_i} \quad (8.0.7)$$

pri čemu je:

R_i - unutrašnja otpornost izvora

R_a - otpor armature (otpor namota)

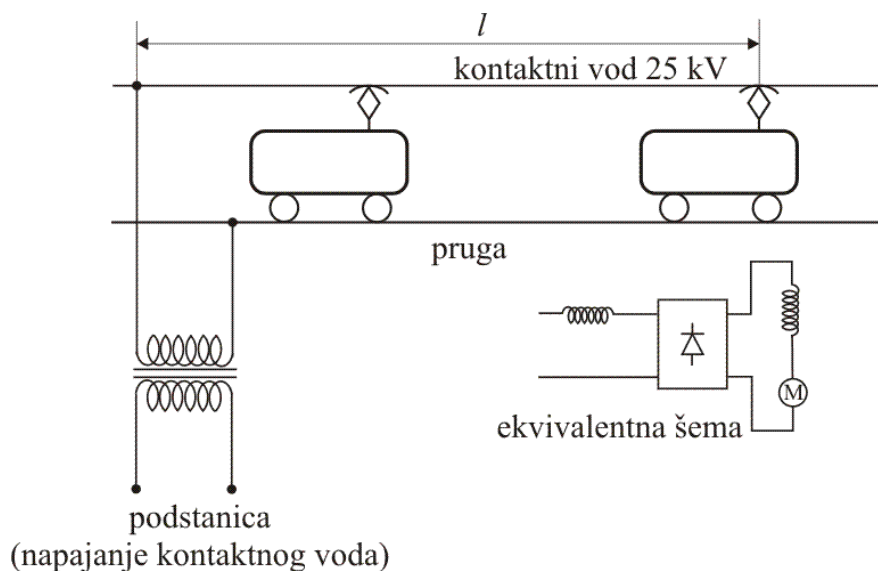
k_m - koeficijent momenta

k_e - koeficijent elektromotorne sile; za dvopolne mašine je $k_e = k_m$

Strmu mehaničku karakteristiku imaju motori koji rade sa konstantnim fluksom (asinhroni motori, jednosmerni motori sa nezavisnom pobudom). Strmina zavisi od kvadrata fluksa, ali zavisi i od karakteristika izvora: ako izvor ima veliku unutrašnju otpornost, strmina je manja pa je i manje iskorišćenje adhezije.

Od udaljenosti vozila (lokomotive) od podstanice zavisi koliku unutrašnju otpornost izvora vidi vučni motor.

Posmatrajmo sledeću sliku na kojoj se vidi podstanica, odnosno napajanje, kontakti vod, dva položaja lokomotive, pruga i ekvivalentna šema celog ovog električnog sistema.



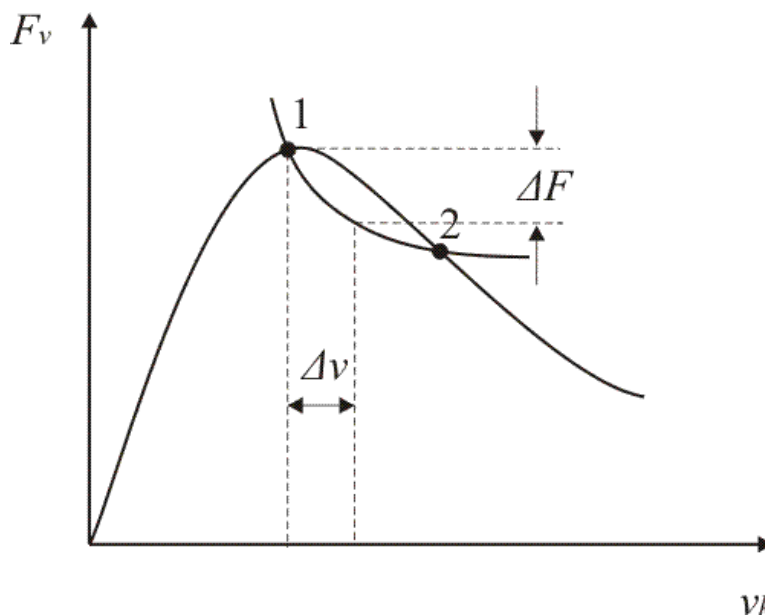
Slika br.8.2. Ilustracija napajanja kontaktnog voda električnog sistema

Kontaktni vod ima svoju impedansu. Takođe, i ispravljač ima svoju reaktansu koja iznosi:

$$\frac{2}{\pi} \cdot L \cdot \omega \quad (8.0.8)$$

Kada je vozilo (odnosno motor) blizu podstanici, on vidi malu unutrašnju otpornost izvora, a ako je motor dalje od podstanice on vidi veću izlaznu otpornost. Prethodno smo, uvođenjem pogona sa tvrdom mehaničkom karakteristikom, videli da u slučaju proklizavanja postoji tendencija povratka u stabilno stanje. U slučaju meke mehaničke karakteristike, u slučaju proklizavanja, vučna sila opada a momenat ostaje približno konstantan pa u momentnoj jednačini postoji pozitivna razlika koja ubrzava osovinu. Ako se pređe u novu tačku preseka mehaničke karakteristike i adhezione krive, nastupa nestabilno stanje po pitanju proklizavanja.

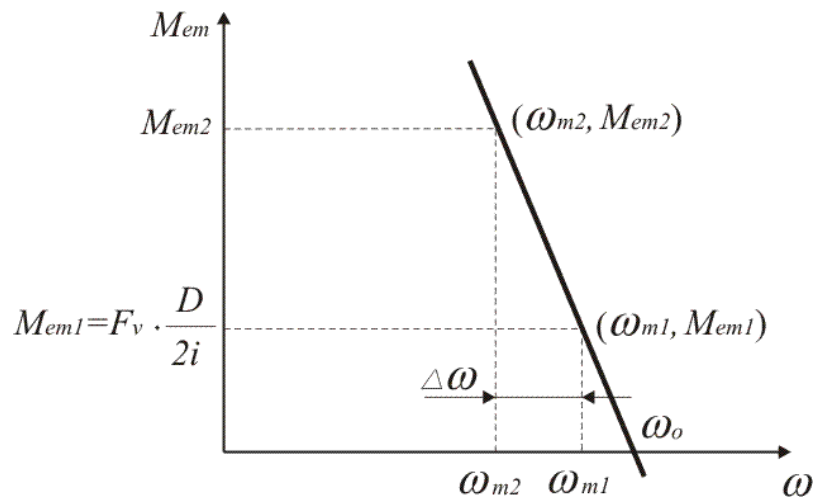
To je prikazano na sledećem grafiku:



Slika br.8.3. Uticaj meke mehaničke karakteristike motora na iskorišćenje adhezije i stabilnost

Da bi se iskoristila adhezija trebalo bi da imamo tvrdi mehaničku karakteristiku. Ali ovde postoje i oprečni zahtevi koji traže meku mehaničku karakteristiku. Vučni motori imaju određenu nominalnu snagu i ta snaga je, naravno, konstantna.

Radi objašnjenja toga, posmatrajmo tvrdi mehaničku karakteristiku prikazanu na narednoj slici i pretpostavimo da postoji samo otpor vuče zbog kretanja po blagom usponu (što odgovara tački u kojoj oznake imaju indeks 1):



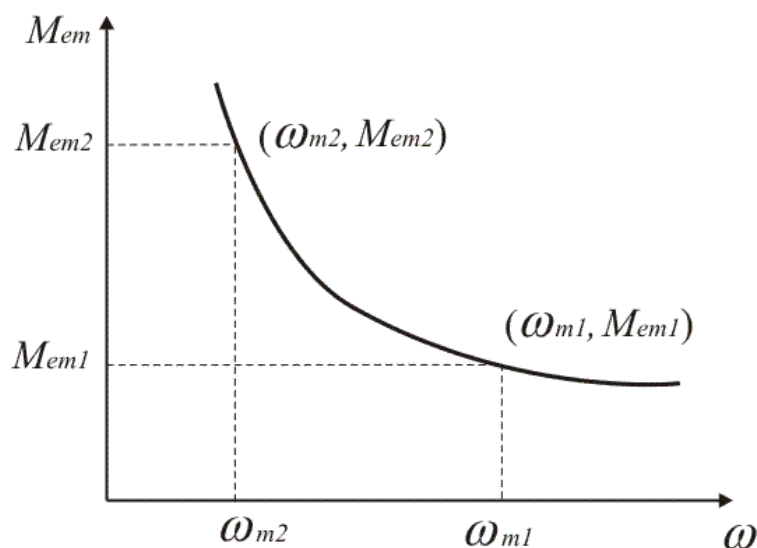
Slika br.8.4. Mehanička karakteristika JS motora sa nezavisnom pobudom kao predstavnik tvrde mehaničke karakteristike

$$F_v = i \cdot (G_a + G_v) \quad (8.0.9)$$

Zapaža se da će se brzina malo menjati pri promeni momenta.

Na usponu otpori kretanju porastu. Moment motora treba da poraste. Recimo da se uspon poveća dva puta. Tada se dva puta poveća i F_v , a takođe i M_{em} , i, naravno, snaga, ali brzina se neznatno smanji *jer je takva mehanička karakteristika motora*. Drugim rečima, udari *(nagla povećanja vučne sile)* se kod tvrde mehaničke karakteristike direktno preslikavaju na moment pa *može* doći do pregrevanja vučnog motora, preopterećenja kontaktnog voda, transformatora, instalacije vozila.

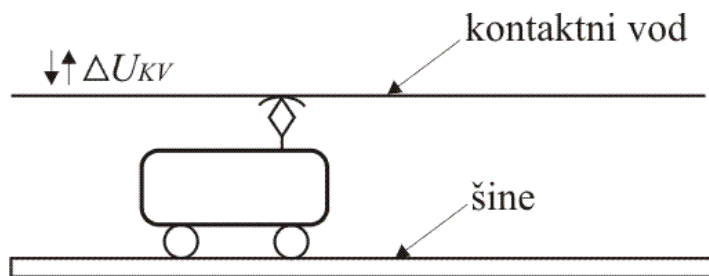
Ako imamo meku karakteristiku:



Slika br.8.5. Mehanička karakteristika JS motora sa rednom pobudom kao predstavnik meke mehaničke karakteristike

Nailaskom na uspon moment raste i brzina opada tako da se radna tačka sa (ω_{m1}, M_{em1}) premešta na (ω_{m2}, M_{em2}) . Ovde se poveća M_{em} , ali i mnogo više pada brzina, tako da snaga ostaje ista, tj. promene strmine trase se ne preslikavaju direktno na promenu momenta i snage motora. Snaga je manje - više konstantna. Zapažamo sposobnost samoregulacije.

Pored ovoga, i promene na kontaktnom vodu (kolebanje njegovog napona) zahteva minimalnu strminu mehaničke karakteristike - S_{min} . Neka je ΔU_{KV} promena napona kontaktnog voda:



Slika br.8.6. Napon kontaktnog voda nije stalan već se kreće u nekim granicama

Za motore jednosmerne struje promena armaturne struje je:

$$\Delta I_a = \frac{\Delta U_{KV}}{R_a + R_i} \quad (8.0.10)$$

odakle se vidi da, pošto je promena struje funkcija promene napona kontaktnog voda, neophodna je minimalna strmina mehaničke karakteristike.

Postoje, dakle, dva oprečna zahteva:

- zbog iskorišćenja adhezije potrebna je minimalna otpornost izvora i maksimalna strmina mehaničke karakteristike:

$$R_i \rightarrow \min; S \rightarrow \max \quad (8.0.11)$$

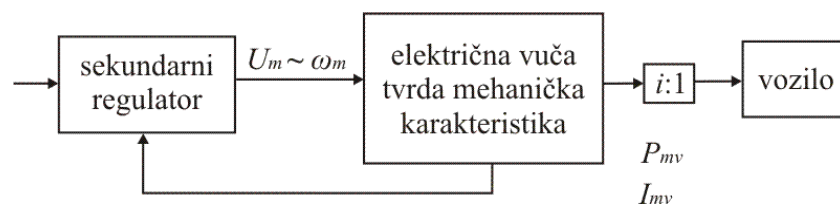
- zbog promene snage ΔP_v zbog promene trase i zbog promene struje usled kolebanja napona kontaktnog voda U_{KV} :

$$R_i \rightarrow \max; S \rightarrow \min \quad (8.0.12)$$

U praksi postoji sledeći slučaj: gradi se jako tvrd izvor (sa minimalnom unutrašnjom otpornošću) i koristi se što strmija mehanička karakteristika.

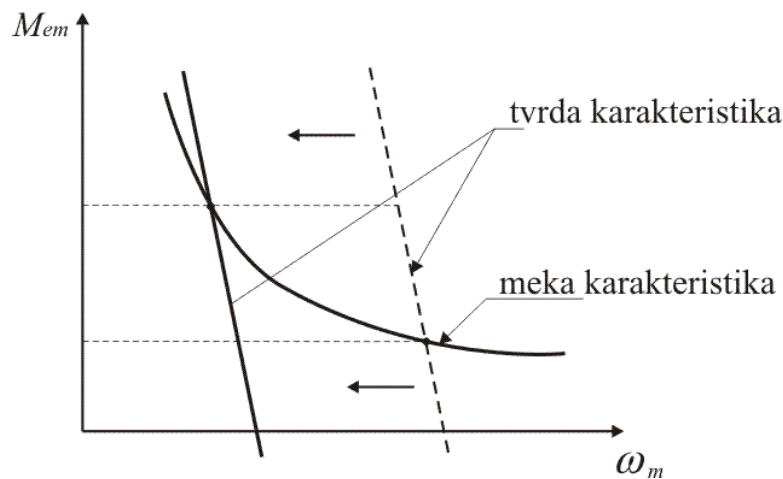
Problemi vučne sile rešavaju se sekundarnom regulacijom. Koristi se regulator vučne sile i brzine. Elektromotorni pogoni se prave sa tvrdom mehaničkom karakteristikom, ali se kontroliše vučna snaga (automatski se detektuje njeno uvećanje), pa se pri usponima translira mehanička karakteristika čime se smanjuje brzina i vučna sila.

Blok šema ovakve regulacije prikazana je na sledećoj slici:



Slika br.8.7. Blok šema sekundarne regulacije. Ovakvom regulacijom nam je omogućeno da koristimo motor sa tvrdom karakteristikom (kriterijum stabilnosti zadovoljen) dok sekundarna regulacije čini da koristimo dobre osobine meke mehaničke karakteristike (P je približno konstantno)

Prikaz transliranja mehaničke karakteristike putem sekundarne regulacije je prikazan na narednoj slici.



Slika br.8.8. Ilustracija sekundarne regulacije na primeru mehaničkih karakteristika

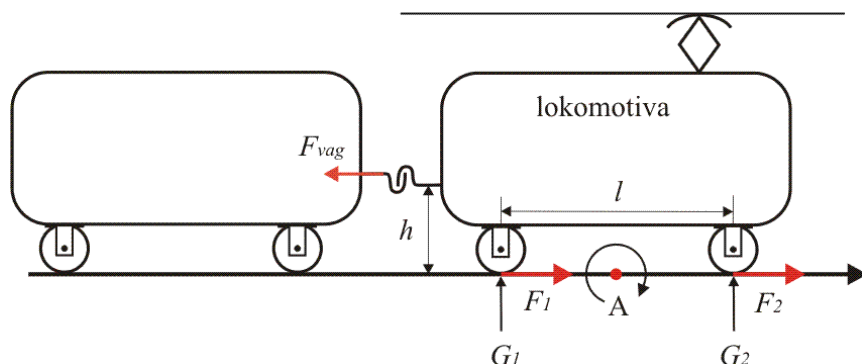
9 Uticaj neelektričnih veličina na iskorišćenje adhezije

Ovde će se razmatrati uticaj konstrukcije lokomotive i uticaj stanja šina.

9.1 Uticaj konstrukcije lokomotive

Ovaj uticaj [videćemo](#) samo kroz analizu visine vešanja, odnosno visine kvačila.

Posmatrajmo na sledećoj slici skicu lokomotive i vagona, povezanih preko kvačila:



Slika br.9.1.1. Ilustracija neravnomerne raspodele adhezije težine u zavisnosti od visine postavljanja kvačila

Poznato je da se na kontaktu točak – podloga razvija vučna sila. Lokomotiva ima dve pogonske osovine sa po jednim motorom koji su međusobno identični.

Posmatraćemo tačku A i u odnosu na nju izvršiti balansiranje momenata koji su prisutni.

Vagoni deluju na lokomotivu silom reakcije F_{vag} . Ukupna težina lokomotive se raspodeljuje na prednju i zadnju osovinu:

$$G_a = G_1 + G_2 \quad (9.1.1)$$

Balansiranjem obrtnih momenata oko tačke A dobija se:

$$G_1 \frac{L}{2} - G_2 \frac{L}{2} - F_{vag} H = 0 \quad (9.1.2)$$

$$G_1 - G_2 = \frac{2H}{L} F_{vag} = \Delta G \quad (9.1.3)$$

$$G_1 = \frac{G_a}{2} + \frac{\Delta G}{2} \quad (9.1.4)$$

$$G_2 = \frac{G_a}{2} - \frac{\Delta G}{2} \quad (9.1.5)$$

U zavisnosti od sile F_{vag} osovinski pritisci se menjaju, kao što se to vidi iz prethodnih izraza. Porastom F_{vag} povećava se ΔG , tj. razlika između G_1 i G_2 , što znači da lokomotiva teži propinjanju. Smanjuje se osovinski pritisak na prednjoj osovini, pojavljuje se opasnost od proklizavanja, maksimalna vučna sila koja može da se razvije je manja.

Zašto je maksimalna vučna sila koja može da se razvije manja?

Lokomotive, kao vučna vozila, se prave uz dosta optimizacija. Prosto je nepotrebno i ekonomski neopravdano u lokomotivu ugrađivati motor od 1[MW] ako ona zbog adhezije može da iskoristi samo 40% te snage. Vučni motori se prilagođavaju posebnim potrebama lokomotive. Ako, radi jednostavnosti, pretpostavimo da naša lokomotiva ima samo dve osovine sa po jednim motorom. To znači da su ti motori projektovani za adhezionu težinu od $G_a/2$. Smanjenjem te težine se smanjuje maksimalna moguća vučna sila koju možemo proizvesti zbog adhezije. Povećanjem te težine povećavamo maksimalnu moguću snagu koju možemo dobiti što se adhezije tiče ali to motor ne može da pruži jer je dimenzionisan za manju snagu (manju adhezionu težinu). Način na koji se to može sprečavati je da se izvrši preraspodela težine tako što će veća težina da se smesti na prednji deo lokomotive. Druga stvar je da se smanji visina kvačila, što takođe smanjuje rizik od propinjanja.

9.2 Uticaj stanja šina

U prethodnim razmatranjima videli smo kako koeficijent adhezije zavisi od stanja šina i kolike su njegove vrednosti u pojedinim slučajevima.

Ograničeni koeficijent adhezije ograničava maksimalnu snagu, maksimalno ubrzanje i maksimalni uspon (odnosno pad) koji može da se savlada.

Izraz za maksimalni uspon u železnici je:

$$i_{\max} = \frac{\xi \cdot G_a \cdot 1000}{G_a + G_v} \quad (9.2.1)$$

uvažavajući sledeći izraz (jednačina vuče je poznata od ranije, pri čemu je a ubrzanje, a i je uspon):

$$1000 \cdot \xi \cdot G_a \geq F_v \approx \left(\sum f_t + i + 102 \cdot a \cdot (1 + \varepsilon) \right) \cdot (G_a + G_v) \quad (9.2.2)$$

uz činjenicu da su zanemareni ostali stalni otpori.

Vrednost maksimalnog uspona za železnicu ide do 30 [%].

Ako uzmemo lokomotivu od 80 [t], teret od 1000 [t] i vrednost adhezionog koeficijenta $\xi=0,3$, dobija se uspon od oko 22 [%]. To je jako mala vrednost, za razliku od drumskih vozila kod kojih maksimalni uspon ide i do 30 [%].

Maksimalna vučna snaga u zavisnosti od brzine v data je izrazom:

$$P_{v \max} = F_v v = \xi G_a v = \frac{\xi_0}{1 + 0,015v} G_a v \quad (9.2.3)$$

Ovo znači da u laganu lokomotivu nema smisla ugrađivati jak motor.

Zbog male adhezije pri velikim brzinama ne može se iskoristiti sva instalisana snaga vučnog pogona.

Vrednost za maksimalno ubrzanje, koje kod teretnih železnica tipično iznosi 1 [m/s^2], a kod putničkih od 1,5 do 2 [m/s^2], data je izrazom:

$$a_{\max} = \frac{1000 \cdot \xi \cdot G_a}{102 \cdot (1 + \varepsilon) \cdot (G_a + G_v)} \quad (9.2.4)$$

U praksi, lokomotive od 80 [t], čije su brzine do 120 [km/h], imaju snage do 10 - 12 [MW] (tipično se prave od 4 [MW]). P_{vmax} je ograničena zbog adhezije.

Pogodno je da vučni motor može da obezbedi i brzo upravljanje momentom. Ako bi voz stajao nekoliko sekundi u jednom mestu i proklizavao stvorila bi se rupa u šini. Kad se detektuje proklizavanje brzina osovine ubrzano raste, pa je potrebno

smanjiti vučni momenat. Ovakva zaštita se zove aktivna protivklizna zaštita. Pomoću nje uvek "jašemo" na prevojnoj tački adhezije krive. Kod automobila i vozova postoji i tzv. ABS (Anti Blocking System) - mehanizam za maksimalno iskorišćenje adhezije. Neophodno je, a to predstavlja i problem, detektovati klizanje i izmeriti ga, pogotovu u okolini F_{max} . Klizanje se meri tako što se detektuje ubrzanje osovine $\frac{d\omega_o}{dt}$.

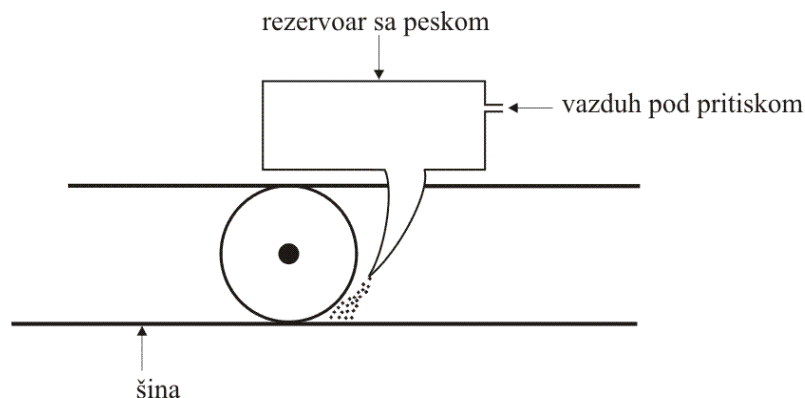
Ako se nalazimo u zoni klizanja, točak se praktično otkāči od podloge i jedino inercija same osovine ograničava ubrzanje. Posmatrajmo sledeću jednakost:

$$J_o \cdot \frac{d\omega_o}{dt} = \Delta M_o \Rightarrow \frac{d\omega_o}{dt} = \frac{\Delta M_o}{J_o} \quad (9.2.5)$$

gde je J_o moment inercije osovine.

Moment inercije osovine je za dva reda veličine manji od momenta inercije vozila. Iz toga sledi da je ubrzanje klizanja za dva reda veličine veće od normalnog ubrzanja.

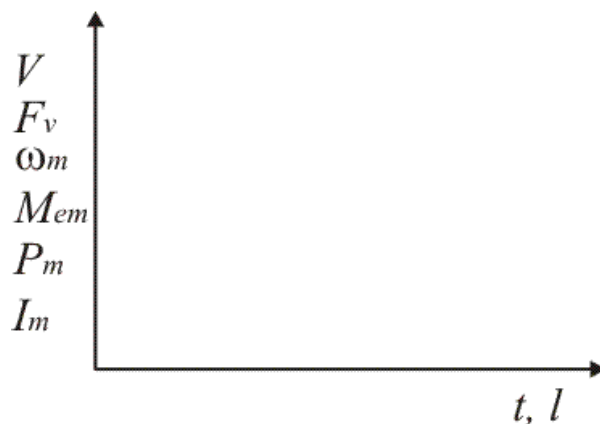
Da bi se izbeglo klizanje moguće je koristiti i uređaj za "peskiranje", prikazan na narednoj slici. Ovo je ujedno i najstarija mera zaštite od proklizavanja i sastoji se u sipanju peska pod pogonske točkove. Ovaj način ima jako erozivni uticaj na šine i točkove i koristi se gde su šine jako prljave (rudnici, itd.).



Slika br.9.2.1. Uređaj za peskiranje šina. Ovom metodom se povećava koeficijent adhezije ukoliko su šine jako prljave

10 Putni dijagrami

Putni dijagrami pokazuju zavisnost relevantnih vučnih veličina u odnosu na vreme ili pređeni put. Oni imaju na apscisnoj osi vreme ili pređeni put, a na ordinati brzinu, vučnu silu, ugaonu brzinu, moment, snagu ili struju. Služe pri projektovanju trasa i za optimizaciju u toku eksploatacije. Na osnovu njih se dimenzioniše kontaktna mreža, podstanice, itd. Njima se najviše bave planeri saobraćaja da bi se optimizirali gubici, ulaganja, itd.

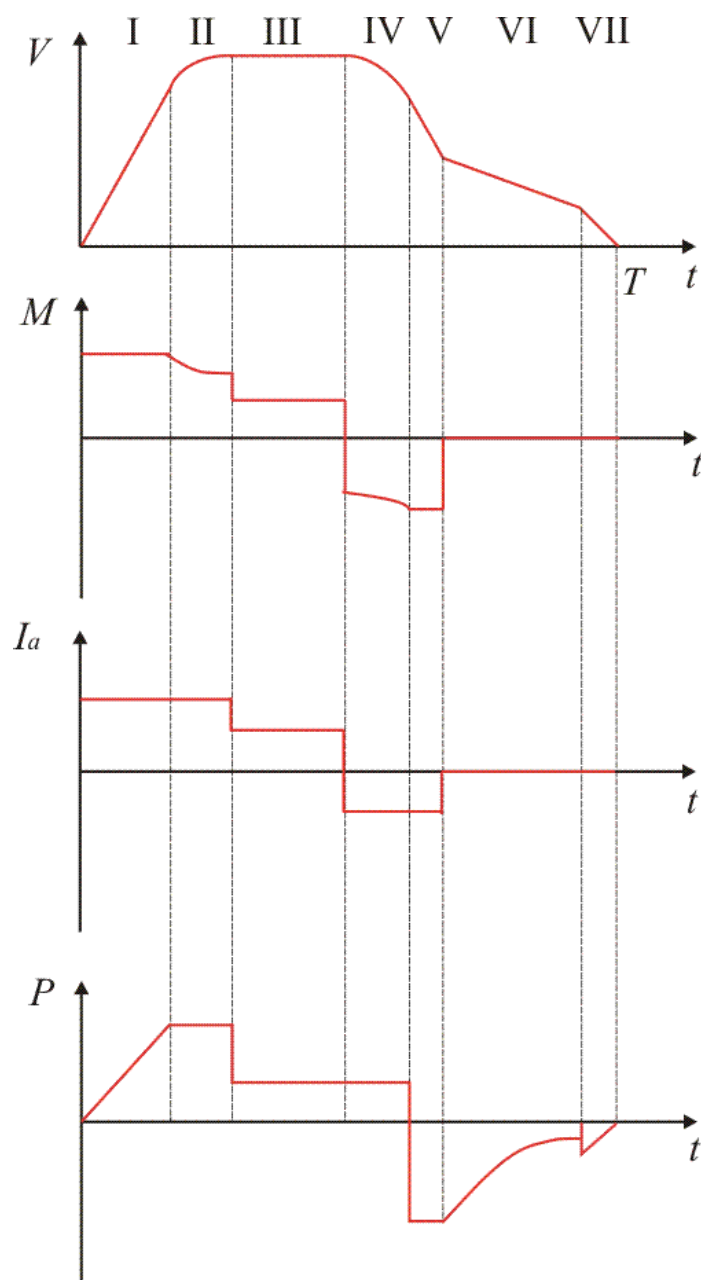


Slika br.10.1. Veličine koje u zavisnosti od vremena ili puta predstavljaju putne dijagrame

Najčešće se analizira zavisnost brzine od vremena. Na osnovu tipične zavisnosti brzine od vremena, uz uslov da je

$$l = \int_0^T v dt \quad (9.2.6)$$

moгуće je konstruisati grafike:



Slika br.10.2. Primeri putnih dijagrama za jednu trasu nekog vozila

Na vremenskim dijagramima, na kojima su prikazane zavisnosti brzine v , momenta M , armaturne struje I_a i vučne snage P , može se uočiti 7 karakterističnih oblasti:

1. ubrzanje ispod ω_{nom} :

$$\omega < \omega_{nom} \quad (9.2.7)$$

Nominalna brzina je brzina pri kojoj nominalno pobuđen motor (sa nominalnim fluksom) razvija elektromotornu silu $e=\omega\cdot\psi$ jednaku nominalnom naponu. Za veću brzinu ω , fluks se umanjuje za $1/\omega$

$$\psi(\omega) = \psi_{nom} \frac{\omega_{nom}}{\omega}, \quad \text{jer je } e \approx U_{nom}. \quad (9.2.8)$$

Zato se kaže da je iznad nominalnih brzina zona slabljenja polja.

U ovoj prvoj oblasti nema rizika da se dobije ems veća od nominalnog napona tako da fluks može da bude nominalan. Ubrzava se nominalnim vučnim momentom, definisanim strujnim kapacitetom pretvarača i nominalnom strujom motora (ne dozvoljava se pregrevanje motora).

$$\omega_m < \omega_{nom}; \quad M = M_{nom} \quad (9.2.9)$$

2. ubrzanje

$$\omega_m > \omega_{nom}; \quad M = \frac{M_{nom} \cdot \omega_{nom}}{\omega} \quad (9.2.10)$$

U ovu fazu se prelazi dostizanjem ω_{nom} . Sada se vrši ubrzanje za $\omega > \omega_{nom}$. Kao što je prethodno objašnjeno fluks će da opada sa $1/\omega$, a momenat koji je po prirodi proizvod struje i fluksa opada isto sa $1/\omega$. Mora se umanjiti fluks jer bi ems otišla iznad nominalnog napona i motor bi izgoreo. Brzina raste sporije zbog opadanja momenta, koji opada zbog opadanja fluksa (struja se ne može uvećati iznad nominalne vrednosti). Brzina raste, momenat opada, snaga je konstantna.

3. vožnja maksimalnom brzinom (obično maksimalna brzina za odgovarajući teret) $M=\text{const}$.

Ovo je putna brzina, bez ubrzanja. Faza 3 najduže traje. Uspostavlja se vučna sila koja kompenzuje otpore kretanju i ona je konstantna.

4. oblast električnog kočenja:

Ako se želi zaustavljanje prvo se usporava. Usporavanje se vrši negativnim pokretačkim momentom, konstantnom snagom, u zoni slabljenja polja. U ovoj oblasti je i dalje $\omega > \omega_{nom}$, a momenat je srazmeran $1/\omega$.

5. oblast električnog kočenja za $M = \text{const}$.

Koči se konstantnim momentom, brzina je manja od nominalne a fluks je nominalan i nema njegovog umanjjenja. Promena brzine je linearna.

6. U ovoj oblasti se isključuje vučni pogon i vozilo se zaustavlja po inerciji usled otpora kretanju koji usporavaju vozilo.

7. Kočenje mehaničkim kočnicama.

Mehaničke kočnice se zadržavaju samo radi sigurnosti. Kad god je moguće koči se električnim kočenjem, fazama 4 i 5. Mehaničke kočnice se teško održavaju (pneumatski ili hidraulični i mehanički delovi). Kada se kočiona papuča priljubi uz točak stvara se sila trenja. Što vozilo sporije ide sila kočenja se povećava i pri samom zaustavljanju postoji trzaj.

Pri svemu ovom je uvedena pretpostavka da se radi o samo jednom motoru za koji važi aproksimacija:

$$P_v = F_v \cdot v \approx M_{em} \cdot \omega_m \approx E_a \cdot I_a \quad (9.2.11)$$

Ovo je sve potrebno da bi se izračunalo termičko opterećenje vučnog motora, vučnog pretvarača, svih izolacija i instalacija, kao i da se napravi energetski bilans na jednoj trasi (izračunavanje ukupne utrošene električne energije). Kada imamo radni ciklus, treba rešiti pitanje srednje snage i problem hlađenja.

10.1 Primer optimizacije putnog dijagrama

Optimizacija putnog dijagrama vrši se radi izbora parametara. Tako se smanjuju troškovi, gubici, smanjuje se utrošeno vreme, itd.

Posmatraće se manipulativno vozilo u magacinu - viljuškar. To je autonomno vozilo (nosi baterije iz kojih crpi energiju).

Moraju se uvesti neke pretpostavke i aproksimacije: motor koji se koristi je motor jednosmerne struje sa nezavisnom pobudom (ima konstantan fluks) i svi gubici kod ovog motora su u armaturnom navoju:

$$\phi = \text{const}; P_{\gamma} = R_a I_a^2 \quad (9.3.1)$$

Zadatak je u vremenu T preći put

$$L = \int_0^T v(t) dt \quad (9.3.2)$$

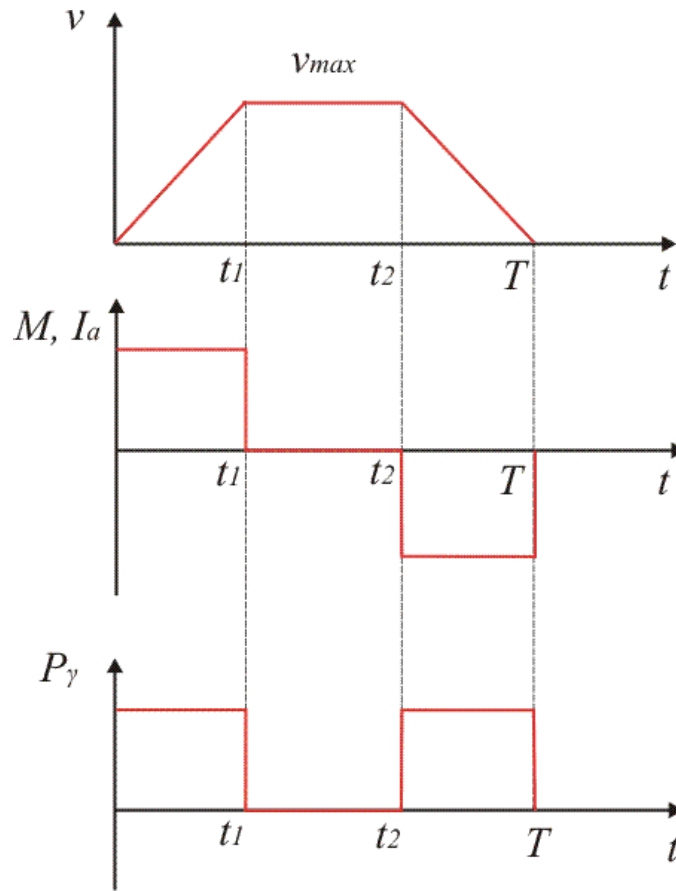
a da utrošena električna energija bude što manja, tj.

$$W_e \rightarrow \min \quad (9.3.3)$$

Potrebno je, dakle, minimizirati utrošak električne energije.

Pretpostaviće se da se vožnja obavlja tako što postoji faza ubrzanja sa konstantnim momentom i traje t_l , faza vožnje maksimalnom brzinom, i faza usporenja do isteka vremena T .

Pretpostavlja se i da se vučni motor napaja iz idealnog vučnog pretvarača, bez gubitaka snage i da je napajanje iz idealne baterije.



Slika br.10.1.1. Uprošćen putni dijagram koji obuhvata polazak sa fazom ubrzanja, vožnju konstantnom brzinom i fazu usporenja do zaustavljanja.

Grafik momenta je isti kao grafik struje jer je momenat proporcionalan proizvodu fluksa i struje.

Analiziraće se sve faze posebno:

- ubrzanje ($0 \div t_1$):

$$P_{izv.} = P_{\gamma} + P_{el.meh.konv.} = R_a I_a^2 + E I_a \quad (9.3.4)$$

Zanemarujući gubitke u prenosu, snagu elektromehaničke konverzije je moguće napisati preko kinetičke energije vozila W_k :

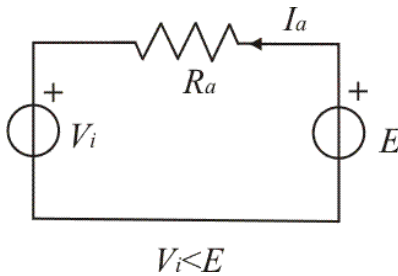
$$E I_a = M_{em} \omega = F_v v = \frac{dW_k}{dt}; \quad W_k = \frac{1}{2} m v^2 \quad (9.3.5)$$

- $v = \text{const}$ ($t_l \div T - t_l$):

Nema konverzije energije, zanemareni svi gubici.

- kočenje ($T - t_l \div T$):

Električno kočenje (ilustrovano je na sledećoj slici)



Slika br.10.1.2. Električna šema motora pri električnom kočenju

Promena energije:

$$-\frac{dW_k}{dt} = EI_a = R_a I_a^2 + P_{izvora} \quad (9.3.6)$$

Iz ovoga se zaključuje da je utrošena energija jednaka zbiru gubitaka u motoru.

Pređeni put predstavlja površinu isvod grafika za brzinu.

Ako ako označimo sa W_e - ukupnu utrošenu električnu energiju, tada se sledećim računom dolazi do optimalne vrednosti za vreme t_l .

Pređeni put se računa na sledeći način:

$$L = \frac{v_{\max}}{2} t_1 + v_{\max} (T - 2t_1) + \frac{v_{\max}}{2} t_1 \quad (9.3.7)$$

Kada se sredi, dobije se izraz za vreme t_l :

$$v_{\max}(T - t_1) = L \Rightarrow t_1 = T - \frac{L}{v_{\max}} \quad (9.3.8)$$

Izraz za ubrzanje glasi:

$$a = \frac{v_{\max}}{t_1} = \frac{v_{\max}}{T - \frac{L}{v_{\max}}} \quad (9.3.9)$$

Vučna sila se dobija na sledeći način:

$$F_v = ma = \frac{2i}{D} M_{em} = \frac{2i}{D} k_m \phi I_a \quad (9.3.10)$$

Vrednost armaturne struje koja je funkcija maksimalne brzine je:

$$I_a = \frac{D}{2i} \frac{1}{k_m \phi} ma = I_a(v_{\max}) \quad (9.3.11)$$

Na kraju, izraz za utrošenu energiju, kao integral snage gubitaka u vremenu T :

$$W_e = \int_0^T P_\gamma dt = 2P_\gamma t_1 \Rightarrow W_e = W_e(v_{\max}) \quad (9.3.12)$$

i on je funkcija maksimalne brzine. Kriterijumska funkcije je integral gubitaka i taj integral treba da se minimizira.

Diferenciranjem izraza za W_e po $v_{\max}$ i njegovim izjednačavanjem sa nulom:

$$\frac{\partial W_e}{\partial v_{\max}} = 0 \quad (9.3.13)$$

dolazi se do rešenja:

$$t_1 = \frac{T}{3}, t_2 = \frac{2T}{3} \quad (9.3.14)$$

Ovaj problem postaje složeniji uvođenjem gubitaka u gvožđu, pretvaraču, uvođenjem sila za savlađivanje otpora, itd.

11 Pregled postojećih elektromotora sa osvrtom na njihovu primenu u električnoj vuči

Vrste motora:

1. redni motor jednosmerne struje
2. motor jednosmerne struje sa nezavisnom pobudom
3. asinhroni motor
4. sinhroni motor sa namotanim rotorom
5. sinhroni motor sa permanentnim magnetom
6. prekidački reluktantni motor (SR)

Važne osobine motora:

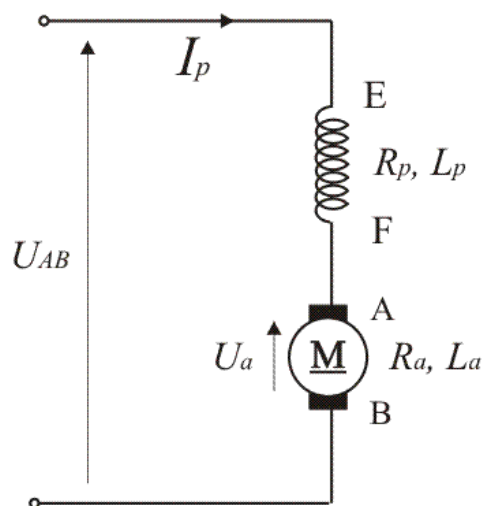
1. regulacija vučne sile
2. polazne karakteristike
3. osetljivost na promene trase (Δi [%]) i promene napona na kontaktnomvodu (ΔU_{KV})
4. mogućnost električnog kočenja i rekuperacije
5. mogućnost rada u oblasti slabljenja polja (zona $P = \text{const.}$)
6. složenost električnog pretvarača

11.1 Motori jednosmerne struje

11.1.a Motor jednosmerne struje sa rednom pobudom

Redni motor jednosmerne struje je prvi motor koji se primenjivao u električnoj vuči.

Redna pobuda motora jednosmerne struje prikazana je na slici:



Slika br.11.1.1. Zamenska šema motora jednosmerne struje sa rednom pobudom

Pobudni namot sa oznakom EF (oznake za rednu pobudu) je vezan na red sa armaturom AB .

Osnovne relacije su:

- elektromagnetni momenat:

$$M_{em} = k_m \phi_p I_a \quad (10.1.1)$$

- elektromotorna sila:

$$E = k_e \phi_p \omega_R \quad (10.1.2)$$

Struja indukta je I_a .

Pobudni fluks glavnih polova:

$$\phi_p = BS \quad (10.1.3)$$

S je površina pola, B je indukcija.

Fluks u pobudnom namotu:

$$\psi_p = N_p \phi_p \quad (10.1.4)$$

gde je N_p broj navojaka.

$$\phi_p = L_p' I_p = \left(\frac{L_p}{N_p} \right) I_p \quad (10.1.5)$$

$$I_p = I_a \quad (10.1.6)$$

Snaga konverzije kod svake električne mašine:

$$P = EI_a = k_e \phi_p \omega_R I_a = k_e \phi_p I_a \omega_R = M \omega_R \quad (10.1.7)$$

Od interesa za električnu vuču je mehanička karakteristika ovog motora. Potrebno je znati karakteristiku magnetizacije. Funkcija $\phi_p=f(I_a)$ nije linearna. Kada kolo nije zasićeno magnetni otpor je:

$$R_\mu \approx \frac{2\delta}{\mu_0 S_{Fe}} \quad (10.1.8)$$

Tada je

$$\mu_{Fe} \gg \mu_0 \quad (10.1.9)$$

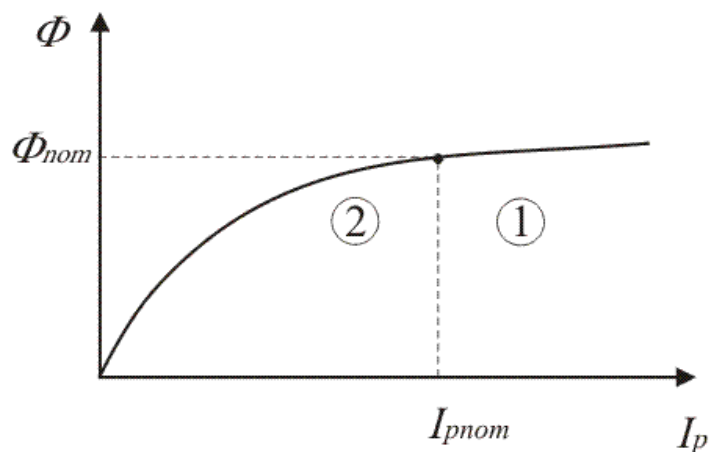
Vazdušni zazor je δ . Induktivnost je

$$L_p = \frac{N_p^2}{R_\mu} \quad (10.1.10)$$

odnosno

$$L'_p = \frac{N_p}{R_\mu} \quad (10.1.11)$$

Kod zasićivanja gvožđa nije više $\mu_{Fe} \gg \mu_0$. Magnetni otpor u gvožđu više nije zanemarljiv. Sada L_p opada, dobija se manja promena fluksa za istu promenu struje. Zavisnost fluksa od struje data je na slici:



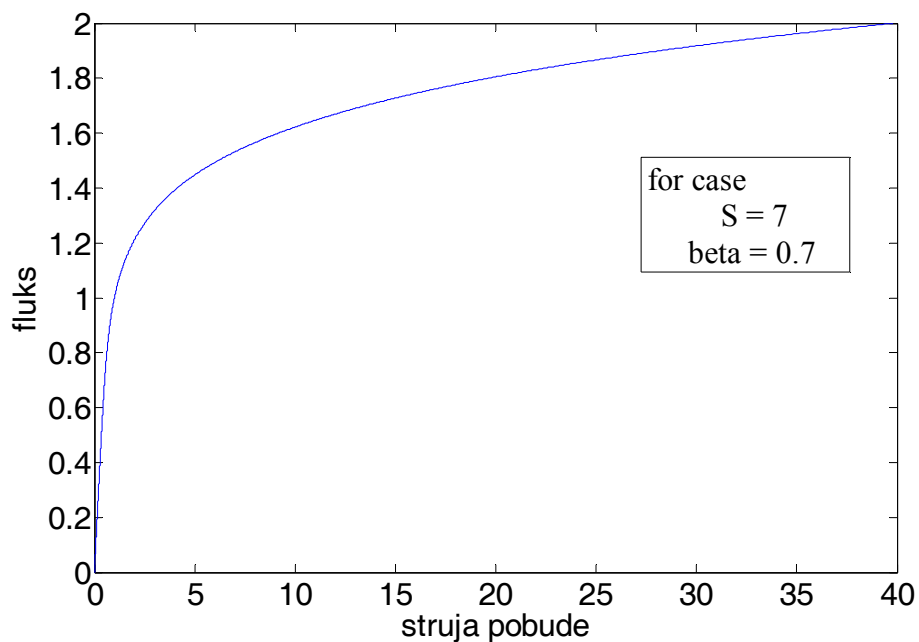
Slika br.11.1.2. Zavisnost fluksa od struje (karakteristika magnećenja)

Dobra praktična aproksimacija krive magnetizacije:

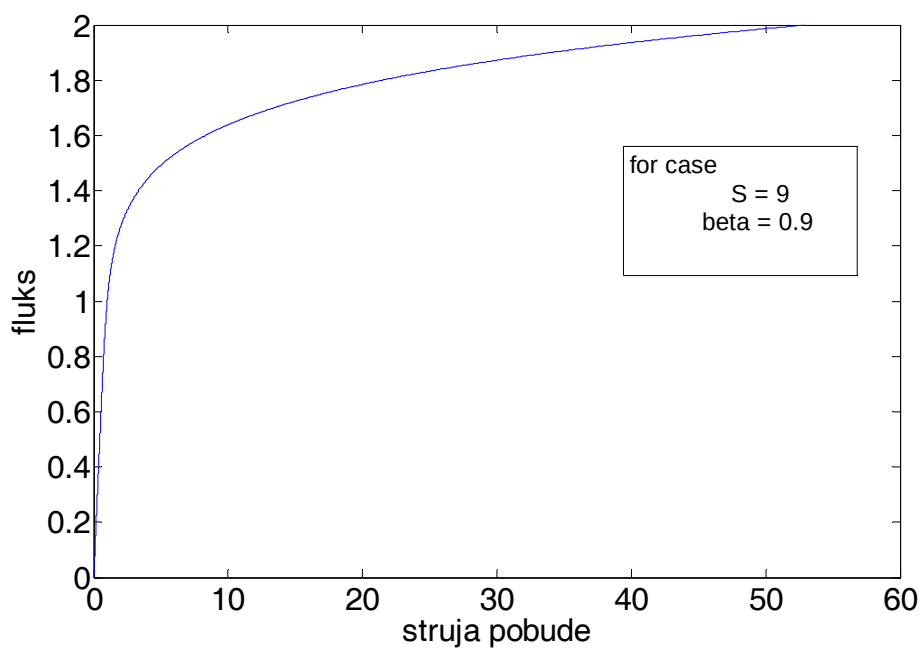
$$\left(\frac{I_p}{I_{pnom}} \right) = \beta \left(\frac{\phi_p}{\phi_{pnom}} \right) + (1 - \beta) \left(\frac{\phi_p}{\phi_{pnom}} \right)^S \quad (10.1.12)$$

Vrednosti parametara su za mašine: $S=7$ i $\beta=0,7$, a za transformatore: $S=9$ i $\beta=0,9$.

Na datoj karakteristici uočavamo dve oblasti. Na narednim slikama se može videti ilustracija prethodne jednacine. Prva slika je aproksimacija za magnetno kolo mašine dok druga predstavlja aproksimaciju koja se koristi u slučaju transformatora.



Slika br.11.1.2(a). Zavisnost fluksa od struje (za mašine)



Slika br.11.1.2(b). Zavisnost fluksa od struje (za transformatore)

U ovoj oblasti, označenoj sa 1 na grafiku, nalazimo se u nelinearnom delu, u delu karakteristike gde se gvožđe mašine nalazi u zasićenju. Armaturna struja je velika. Momenat je veliki. Promena pobudne struje utiče malo ili nikako na promenu fluksa, kao da je u pitanju motor jednosmerne struje sa nezavisnom pobudom.

$$U = (R_a + R_p)I_a + k_e \phi_{p \max} \omega_R \quad (10.1.13)$$

$$M = k_m \phi_{p \max} I_a = k_m \phi_{p \max} \frac{U - k_e \phi_{p \max} \omega_R}{R_a + R_p} \quad (10.1.14)$$

$$M = k_m \phi_{p \max} \frac{U}{\sum R} - \frac{k_m k_e \phi_{p \max}^2}{\sum R} \omega_R \quad (10.1.15)$$

$$\omega_R(M) = \frac{U}{k_e \phi_{p \max}} - M \frac{\sum R}{k_e k_m \phi_{p \max}^2} \quad (10.1.16)$$

Oblast označena brojem 2 na grafiku predstavlja oblast u kojoj je karakteristika linearna. Struja je mala i od nje fluks zavisi linearno. Momenat je mali, kolo je nezasićeno. Izraz za momenat je:

$$M_{em} = k_m \phi_p I_a \quad (10.1.17)$$

U linearnoj oblasti važi:

$$\phi_p = L_p' I_p = L_p' I_a \quad (10.1.18)$$

pa je:

$$M_{em} = k_m L_p' I_a^2 \quad (10.1.19)$$

Jednačina naponskog balansa je:

$$U = (R_a + R_p)I_a + k_e \phi_p \omega_R = (R_a + R_p)I_a + k_e L_p' I_a \omega_R \quad (10.1.20)$$

U zoni malih struja se može uzeti da je:

$$U \approx k_e \phi_p \omega_R = k_e \dot{L}_p I_a \omega_R = k_e \frac{L_p}{N_p} I_a \omega_R \quad (10.1.21)$$

Momenat je:

$$M_{em} = k_m \frac{L_p}{N_p} I_a^2 = k_m \frac{L_p}{N_p} \left(\frac{U}{k_e \frac{L_p}{N_p} \omega_R} \right)^2 \sim \frac{1}{\omega_R^2} \quad (10.1.22)$$

Sledi da je izraz za brzinu:

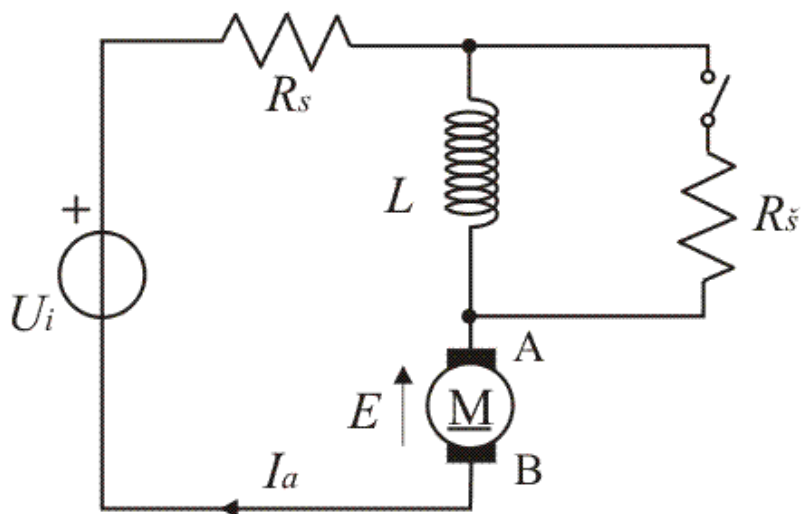
$$\omega_R(M) \sim \frac{1}{\sqrt{M_{em}}} \quad (10.1.23)$$

Kao rezultat dobija se meka karakteristika i postoji prirodna tendencija da motor održava konstantnu snagu.

11.1.a.1 Reostatska regulacija vučne sile

Vučna sila se jedino kod ovog motora može regulisati reostatski.

Posmatračemo dva dodatna otpornika. Jedan se stavlja na red i to je serijski otpornik, a drugi je šant i postavlja se paralelno. To se vidi na sledećoj slici:

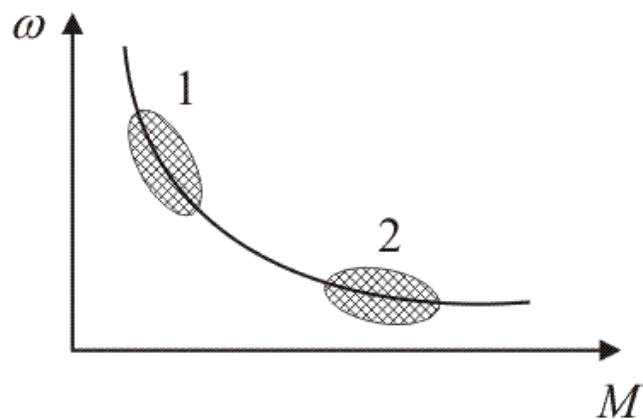


Slika br.11.1.3. Zamenska šema motora jednosmerne struje sa rednom pobudom i otpornicima za reostatsku regulaciju vučne sile

Oznake na prethodnoj slici:

- R_s serijski otpornik
- $R_{\check{s}}$ otpornik za šantiranje pobudnog namotaja
- L predstavlja pobudni namotaj

Na sledećoj slici je prikazana mehanička karakteristika rednog motora.



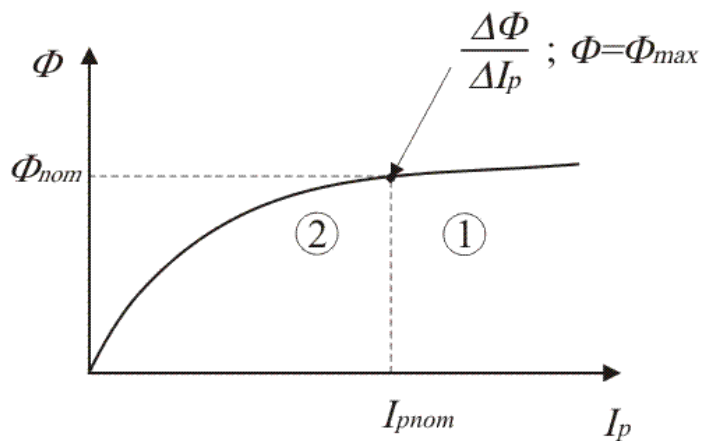
Slika br.11.1.4. Dve karakteristične oblasti na mehaničkoj karakteristici rednog motora

Oblasti označene na grafiku objašnjene se u prethodnom razmatranju. Sada će se dati rezime posmatrajući karakteristiku.

U oblasti 1 postoji veliki moment što znači da je i armaturna struja velika pa i velika struja magnećenja:

$$M \uparrow \Rightarrow I_a \uparrow \Rightarrow I_p \uparrow \quad (10.1.24)$$

Ulazi se sve dublje u nelinearni deo krive magnećenja što je prikazano na sledećoj slici.



Slika br.11.1.5. Zavisnost fluksa od struje (karakteristika magnećenja). Postoji nominalna vrednost fluksa (tada je magnetni materijal dobro iskorišćen)

U oblasti 1 je tvrda mehanička karakteristika.

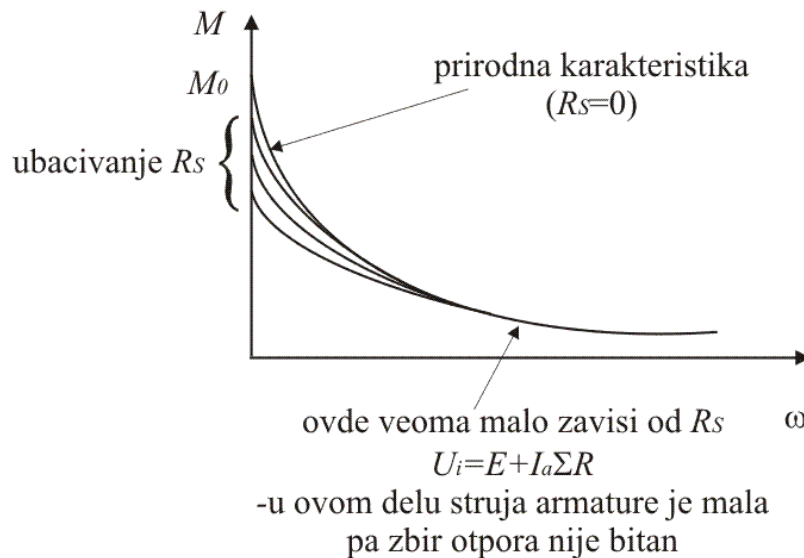
U oblasti 2 je meka mehanička karakteristika - strmina je mala.

$$\phi = L_p \cdot I_p; M \sim I_a^2; \quad (10.1.25)$$

Promene koje nastaju ubacivanjem serijskog otpornika su prikazane na sledećoj slici, pri čemu važi da je :

$$M_0 = k_m \phi_{\max} \frac{U_i}{\Sigma R} \quad (10.1.26)$$

R_s se koristi za regulaciju vučne sile pri polasku vozila, jer R_s menja vrednost za M_0 .



Slika br.11.1.6. Skup mehaničkih karakteristika za različite vrednosti dodatnog otpora

Ako je rad u linearnom delu serijski otpornik će uneti neznatnu promenu. Varijacija serijskog otpornika ima mali uticaj na mehaničku karakteristiku u zoni linearnog rada zbog toga što je armaturna struja mala i $U \approx E$.

U nelinearnoj zoni fluks je maksimalan i posmatrajući prethodno date izraze za momenat vidi se da suma otpora ima suštinski uticaj. Povećanjem vrednosti serijskog otpornika smanjuje se vrednost momenta. R_s reguliše strminu karakteristike. Variranjem ovog otpora stvara se familija karakteristika.

Nijednim R_s se ne može ići iznad prirodne karakteristike (slučaj kada je R_s jednako nuli – misli se na dodatni otpor). Zato se koristi otpornik za šantiranje polja. Mesto ubacivanja ovog otpornika dato je na jednoj od prethodni slika. Pobudna struja više nije jednaka armaturoj. Među njima postoji sledeći odnos:

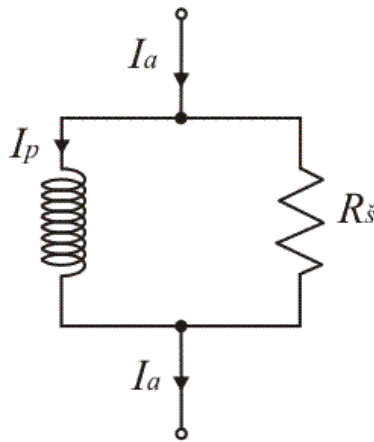
$$I_p = \frac{R_{sant}}{R_{sant} + R_p} I_a = a I_a \quad (10.1.27)$$

Sledi da je odnos šantiranja polja:

$$a = \frac{R_{sant}}{R_{sant} + R_p} \quad (10.1.28)$$

Pošto je I_p sada manje nego pre šantiranja, manji je i fluks. Pošto je napon u balansu sa elektromotornom silom, mora se povećati brzina. To je neobična osobina mašina. Ako smanjimo struju mašina se obrće brže. Šantiranje polja ima tendenciju da uveća brzinu a to zavisi od karakteristike opterećenja. Postavlja se pitanje kakva će da bude varijacija brzine pri šantiranju polja, ako je momenat opterećenja stalan?

Šantiranje ćemo slikoviti da prikažemo sledećom šemom:



Slika br.11.1.7. Raspodela struja prilikom šantiranja pobudnog namotaja

Poznato je da se povećanjem R_s karakteristika obara prema apscisi u zoni velikih momenata i malih brzina.

Analiziraćemo dva slučaja.

Pretpostavićemo da je momenat opterećenja konstantan. Smatraće se da je obavljeno šantiranje polja otpornikom R_s . Ako vrednost otpora šanta teži beskonačnosti, tj. ako nema šantiranja, imaće se početni uslovi:

brzina: ω_0 ,

struje: $I_{a0}=I_{p0}$

elektromagnetni momenat koji mašina u ovom režimu realizuje:

$$M_{em}^0 = k_m L_p ' I_{a0} I_{p0} \quad (10.1.29)$$

Pretpostavljamo još i da je magnetno kolo linearno, jer otpornik za šantiranje nema izraženog efekta ako je magnetno kolo u zasićenju zbog toga što varijacija pobudne struje ne utiče na mehaničku karakteristiku.

Napon koji se dovodi na motor je:

$$U_M \approx k_e L_p ' I_{p0} \omega_0 \quad (10.1.30)$$

Napon je blizak elektromotornoj sili jer su padovi napona na otpornicima zanemarivi.

Ukoliko se obavi šantiranje polja, u sledećem stacionarnom stanju će biti:

$$I_{p1} = \frac{R_{sant}}{R_{sant} + R_p} I_{a1} = I_{a1} a, \quad a < 1 \quad (10.1.31)$$

Takođe mora da važi

$$M_{em}^0 = M_{em}^1 = M_{opt} = k_m L_p ' I_{p1} I_{a1} \quad (10.1.32)$$

jer motor mora da razvija isti momenat.

Mora da važi i sledeći izraz za napon:

$$U_M \approx k_e L_p ' I_{p1} \omega_1 \quad (10.1.33)$$

Iz prethodnih konstatacija zaključuje se:

$$a I_{a1}^2 = I_{a0}^2 \quad (10.1.34)$$

Iz ovoga sledi:

$$I_{a1} = \frac{I_{a0}}{\sqrt{a}} \quad (10.1.35)$$

Pošto je:

$$U_M = k_e L_p ' I_{p0} \omega_0 = k_e L_p ' I_{p1} \omega_1 \quad (10.1.36)$$

sledi da je:

$$I_{p0} \omega_0 = I_{p1} \omega_1 \quad (10.1.37)$$

odakle se za brzinu dobija:

$$\omega_1 = \frac{\omega_0}{\sqrt{a}} \quad (10.1.38)$$

Kako je izraz za snagu:

$$P = M \omega \quad (10.1.39)$$

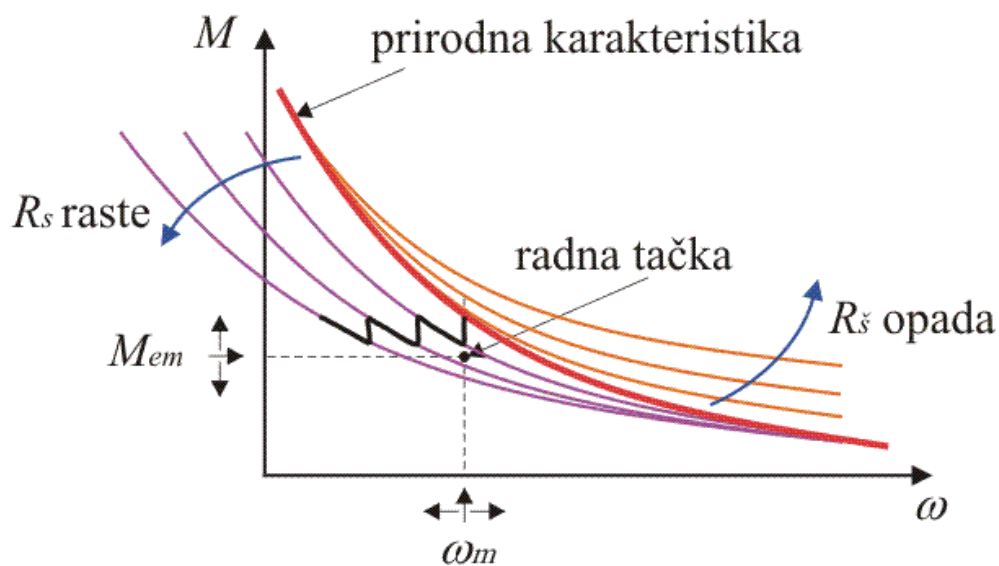
važi:

$$P_1 = \frac{P_0}{\sqrt{a}} \quad (10.1.40)$$

Sve ovo važi za slučaj konstantnog opterećenja. Ukoliko opterećenje nije konstantno, to se mora uzeti u obzir.

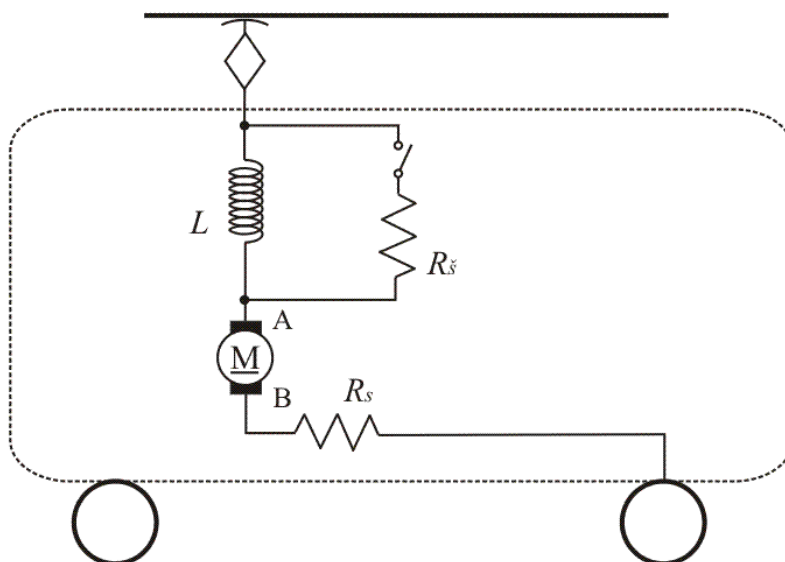
Varijacijom otpornika šanta dobija se familija krivih koje se razdvajaju u jednom delu grafika, a asimptotski približavaju u drugom. Karakteristike se razdvajaju od prirodne kada otpor šanta opada. Prirodna karakteristika ima se za $R_s = 0$ i $R_{\text{šant}} \rightarrow \infty$.

Varijacijom serijskog otpornika i otpornika šanta mogu se ostvariti razne vrednosti momenta i brzine. To je prikazano na grafiku:



Slika br.11.1.8. Skup mehaničkih karakteristika za različite vrednosti dodatnih otpora.
Uticaji povećanja serijske otpornosti i šantiranja pobude.

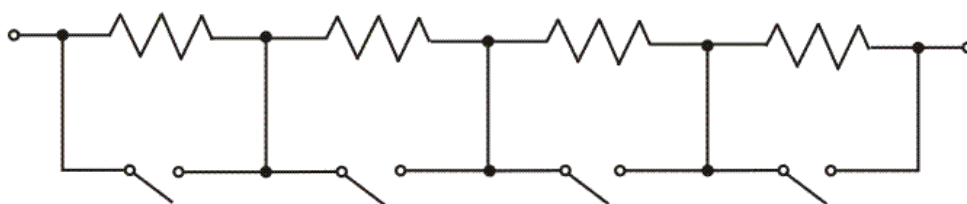
Sledeća slika daje izgled lokomotive sa otpornicima serijskim i šantom, i motorom.



Slika br.11.1.9. Izgled lokomotive sa serijskim otpornicima, šantom polja, i motorom.

Obično je potrebno menjati oba parametra (M_{em} , ω_m).

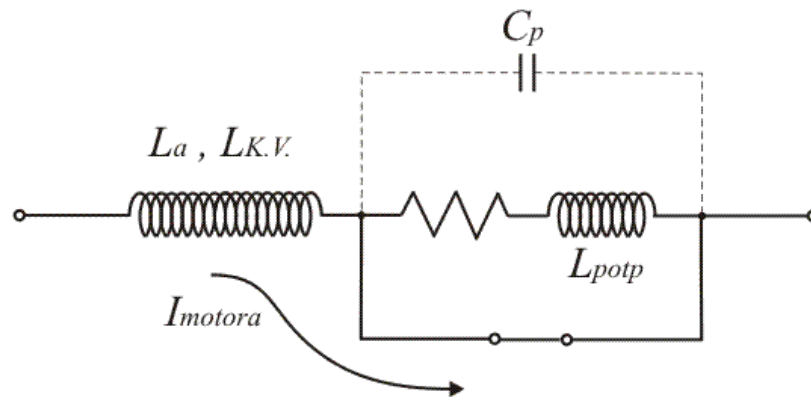
Otpornik R_s ima segmente pa se karakteristika ne može pomerati kontinualno. To je prikazano na slici:



Slika br.11.1.10. Način vezivanja segmenata otpora radi dobijanja više mogućih vrednosti seriskog otpora. Tada je finija regulacija vučne sile.

Imamo diskretnu regulaciju. Isključivanjem dela otpornika brzina se povećava. Kao posledica promene otpora jeste prelazak sa jedne karakteristike na drugu. U tim trenucima prelaska brzina se ne menja već se menja kretanjem po novoj karakteristici. Ako je potrebna konstantna brzina, a na putu je zahtev za povećanjem vučne sile, uključuje se šant, pa se postepeno smanjuje njegov otpor.

Prekidači koji se koriste za priključenje serijskog otpornika i šanta moraju da budu specijalne izrade. Važno je da budu opremljeni duvačima električnog luka. Zatvaranje prekidača nije problem. Problematično može da bude njegovo otvaranje. U kolu postoji puno induktivnosti (pobuda, armatura). Nema ni otpornika bez induktivnosti. Otpornici imaju svoje parazitne i induktivnosti i kapacitivnosti.



Slika br.11.1.11. Kratkospojni prekidači. Problem je isključenje.

Pri otvaranju prekidača pojavljuje se debalans struje, koja ne može trenutno da se uspostavi kroz prigušnicu. Na samom prekidaču će se indukovati

$$U_{pr} = L_p \frac{di_p}{dt} \quad (10.1.41)$$

Na parazitnim kapacitivnostima napon se povećava dok se ne pojavi proboj na prekidaču, tj. električni luk. Napon luka je 20 do 30V. Plazma koja se stvara topi kontakte i provodnik pa se zato struja ovog luka mora prekinuti pomoću duvača luka. Duvači luka mogu da funkcionišu na principu komprimovanog vazduha ili na elektromagnetnom principu ([magnetno oduvavanje el. luka](#)).

Ovi prekidači se moraju redovno održavati i menjati. Srednje vreme između dva kvara je za red veličine manje nego kod čopera.

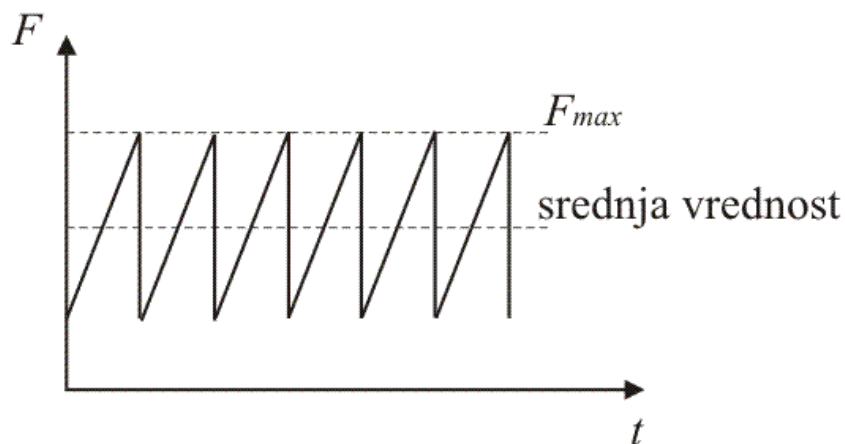
Kod tramvaja i trolejbusa se i danas nalazi redni motor i vučna sila se reostatski reguliše. Polazak vozila se vrši uključenjem segmenta R_s tako da je polazni momenat

dovoljan ($\omega=0$; $M_p > M_n$). Vozilo se ubrzava, a kad se momenat smanji, isključuje se deo serijskog otpornika (R_s se smanjuje) da momenat ne bi puno pao i prelazi se na novu karakteristiku. Tako se stiže do prirodne karakteristike ($R_s=0$). Sada se uključuje otpor šanta (njegova velika vrednost), koji se postepeno smanjuje i tako se udaljava od prirodne karakteristike.

Pri zaletanju vozila moment neće biti kontinualan (zbog toga što karakteristiku ne možemo kontinualno pomerati), već će on biti kao na slici, tj. testera, usled čega se javljaju pulsacije momenta. Ako imamo veći broj segmenata R_s pulsacije će biti manje. Obično je broj segmenata $N_{seg}=12 \div 24$. Promena momenta pri promeni serijskog otpora je manja što je veći broj segmenata:

$$\Delta M \sim \frac{M_{nom}}{N_{seg}} \quad (10.1.42)$$

Posledica pulsacije momenta je neprijatna vožnja i nedovoljno iskorišćenje adhezije jer je srednja vrednost vučne sile manja od maksimalne, što je prikazano na slici:



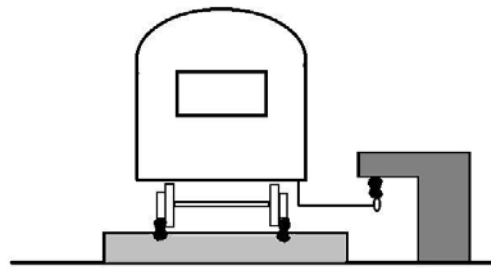
Slika br.11.1.12. Vučna sila se reguliše diskretnim vrednostima otpora (ne kontinualno) pa stoga postoje ripl vučne sile.

Sekundarni efekat svega ovoga je ubrzano habanje prenosnog mehanizma.

Negativan efekat su i gubici snage u otporniku R_s .

Najveći broj metroa koristi reostatsku regulaciju vučne sile. Kompozicije su od tri do pet vagona od po približno $20t$, a na čelu i začelju su motorna kola, koja su teška od $35t$ do $45t$. Maksimalna brzina je od 120 do $130km/h$, a srednja brzina je oko $60km/h$. Na putnom dijagramu je više od 50% faza ubrzanja i usporenja, zbog blizine stanica. Ubrzanja su na granici izdržljivosti putnika, oko $1,5m/s^2$, a u vreme špica i do $2,5m/s^2$. Snage po motornim kolima su od 400 do $800kW$. Motori su obično jedinice od 150 do $200kW$.

Napajanje se vrši pomoću treće šine koja se nalazi na nosaču i okrenuta je na dole radi zaštite putnika i zaštite od prljavštine. Nema kontaktni vod kao u nadzemnoj železnici, jer se tako smanjuju troškovi izgradnje visokih podzemnih tunela. Naponi su 1200 do $1500V$, a struje su 800 do $1000A$. Šine su ugrađene u beton i imaju elastične omotače da bi se ublažile vibracije.



Slika br.11.1.13. Mogući način napajanja vučnog vozila

Kod tramvaja postoji kontaktna mreža ($600V$ do $700V$), snage su tri do četiri puta manje nego kod metroa ($4 \times 70kW$), a struje su 500 do $600A$. Težine su $25t$ do $40t$, a maksimalne brzine 60 do $70km/h$.

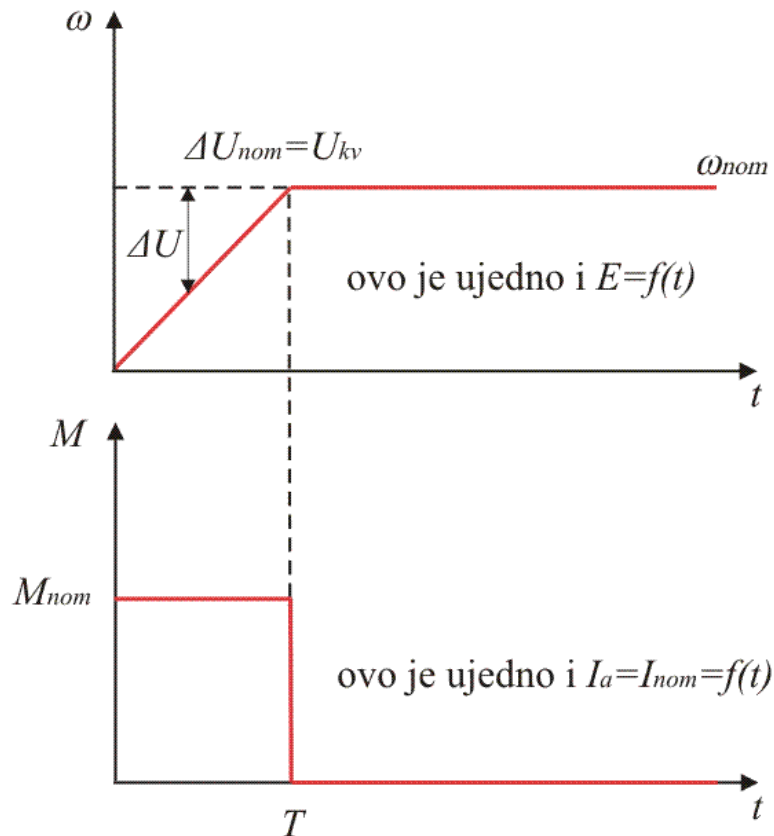
Reostatska regulacija vučne sile je disipativna regulacija. Zaletanje je energetski nepovoljno.

Usvojiće se uprošćen model kod koga su sve inercije ekvivalentirane inercijom motora J_m . Tako imamo da važi:

$$J_m \frac{d\omega}{dt} = M_{em} \quad (10.1.43)$$

Pretpostaviće se da se zaletanje obavlja sa konstantnim ubrzanjem od 0 do ω_m . Sledi da je struja I_a konstantna. Usvoja se da je $\phi = const.$ jer se nalazimo u zoni zasićenja.

Na osnovu rečenog moguće je nacrtati sledeće grafike:

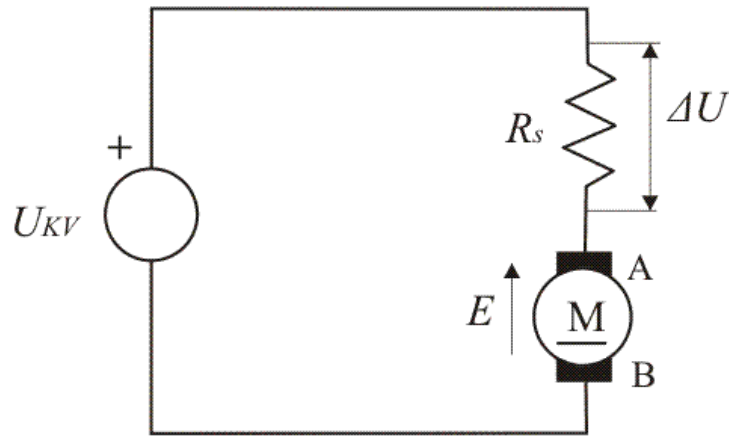


Slika br. 11.1.14. Vremenska zavisnost brzine (ems) i momenta (struje) pri zaletanu do idealnog praznog hoda

Nominalna brzina je ona pri kojoj elektromotorna sila u namotajima nominalno pobuđenog motora dostiže vrednost nominalnog napona napajanja:

$$\omega_{nom} = \frac{U_{KV}}{k_e \phi_{nom}} \quad (10.1.44)$$

Kako će se napajati ovaj motor?



Slika br.11.1.15. Zamenska šema motora JS sa dodatnim seriskim otporom

Važi sledeće:

$$\Delta U = U_{KV} - E \quad (10.1.45)$$

$$R_s = \frac{U_{KV} - E(\omega)}{I_a} \quad (10.1.46)$$

Potrebno je pronaći gubitke u R_s .

Iz prethodnog se zaključuje:

$$J \cdot \omega_{nom} = T \cdot M_{nom} \quad (10.1.47)$$

Grafik ems su u potpunosti poklapa sa grafikom $\omega=f(t)$ u određenoj srazmeri jer je:

$$E = k_e \phi \omega \quad (10.1.48)$$

Ako zanemarimo padove napona na namotajima:

$$U_m \approx (R_a + R_p)I_{nom} + E \approx E \quad (10.1.49)$$

Grafik $I_a=f(t)$ se u potpunosti poklapa sa grafikom $M=f(t)$ u određenoj srazmeri jer važi:

$$I_a = \frac{M}{k_m \phi} \quad (10.1.50)$$

Označavajući sa W_m - energiju saopštenu motoru, sa W_k - kinetičku energiju, i zanemarujući sve otporne momente, do izraza za energiju izvora W_{izv} dolazimo sledećim izvođenjem:

$$W_{izv} = \int_0^T U_{KV} i_{KV} dt = T U_{KV} I_{a_nom} \quad (10.1.51)$$

$$W_m = \int_0^T u_m(t) i_a(t) dt = \frac{T}{2} U_{KV} I_{a_nom} \quad (10.1.52)$$

$$W_m = \int_0^T e(t) i_a(t) dt = \int_0^T k_e \phi \omega \frac{M_{em}}{k_m \phi} dt \Rightarrow \quad (10.1.53)$$

$$W_m = \int_0^T M_{em} \omega dt = \int_0^T W_{meh} dt \quad (10.1.54)$$

S obzirom da važi:

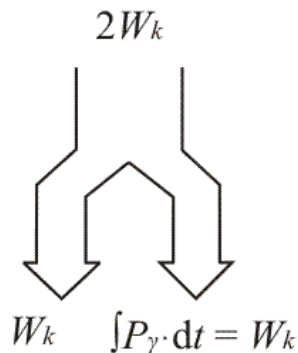
$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{em} - M_m \approx M_{em} \quad (10.1.55)$$

sledi:

$$W_m = \int_0^T M_{em} \omega dt = \int_0^T J \frac{d\omega}{dt} \omega dt = \int_0^{\omega_{nom}} J \omega d\omega = \frac{1}{2} J \omega_{nom}^2 = W_k \Rightarrow \quad (10.1.56)$$

$$\Rightarrow \frac{T}{2} U_{KV} I_{a_nom} = \frac{1}{2} J \omega_{nom}^2 \Rightarrow W_{izv} = 2W_m = 2W_k \quad (10.1.57)$$

Iz svega ovoga se može zaključiti da polovina energije uzete iz izvora odlazi na gubitke u otporu (pretvara se u toplotu), a druga polovina se pretvara u kinetičku energiju. To je slikovito prikazano:



Slika br.11.1.16. Ilustracija toka energije uzete iz izvora

Pošto se vožnja ne sastoji samo od zaletanja, ovo ne važi u praksi, tj. gubici nisu jednaki polovini uložene snage, ali vidimo da su gubici u R_s veliki.

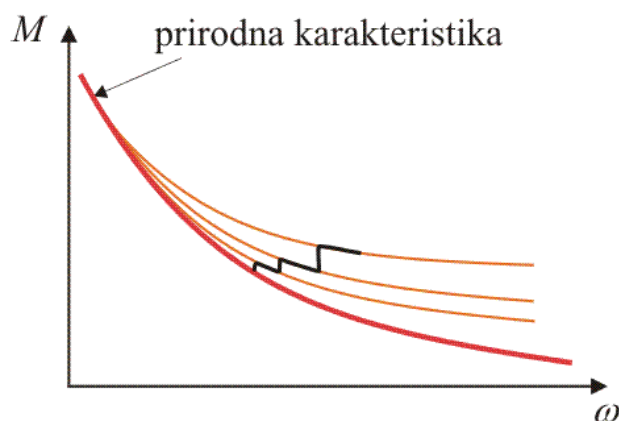
Možemo odmah rezimirati osnovne karakteristike reostatske regulacije vučne sile: promena momenta se vrši diskontinualno i metoda je disipativna.

Ako bismo raspolagali čoperom koji može kontinualno menjati napon na motoru, ne bi bilo gubitaka (pod svim prethodnim pretpostavkama).

Analizirajmo sada uticaj otpornika za šantiranje polja i njegovu konstrukciju. Njegove osnovne karakteristike su:

- gubici u R_s su zanemarivi,

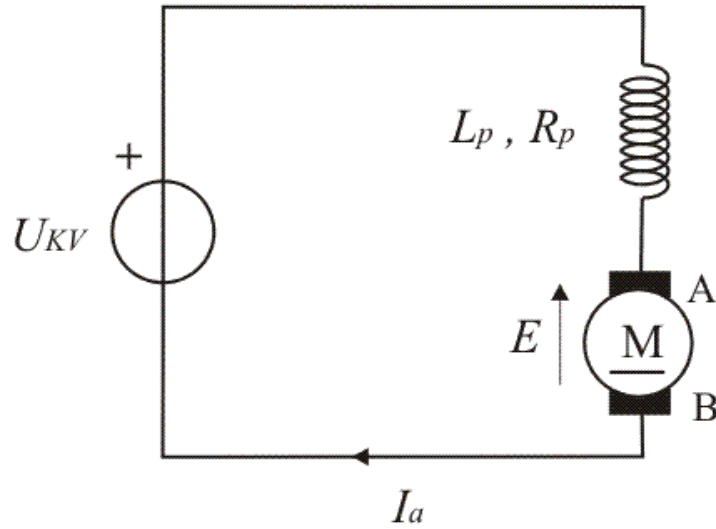
- i R_s je izveden segmentno, pa ako hoćemo iz neke tačke da povećamo brzinu ω , prelazimo na sledeću karakteristiku promenom R_s , što je prikazano na narednoj slici pa je i pri ovome prisutna pulsacija momenta.



Slika br.11.1.17. Ilustracija prelaska redne tačke sa jedne na drugu karakteristiku

Još jedna bitna osobina R_s je da ima znatnu induktivnost zbog smanjenja osetljivosti na promene U_{KV} . Njegova induktivnost je samerljiva sa induktivnošću pobudnog namotaja.

Najpre posmatrajmo šemu bez R_s :



Slika br.11.1.18. Zamenska šema JS motora bez dodatog seriskog otpora

Mogu se napisati sledeće jednačine:

$$U_{KV} = E + (R_a + R_p) \cdot i_a + (L_p + L_a) \frac{di_a}{dt} \quad (10.1.58)$$

$$U_{KV} = \omega k_m L_p^* i_a + (R_a + R_p) \cdot i_a + L_p \frac{dI_a}{dt} \quad (10.1.59)$$

Pri ovom izvođenju je L_a zanemarljivo u odnosu na L_p , dok je uvedena sledeća oznaka:

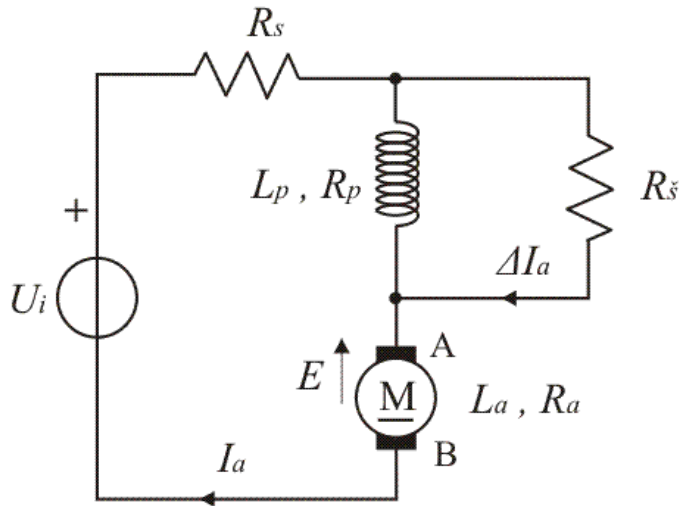
$$L_p^* = \frac{L_p}{N_p} \quad (10.1.60)$$

Interesuje nas tranzijentna (dinamička) impedansa motora, tj. koliki će skok I_a proizvesti promena U_{KV} , pri čemu ćemo tranzijent u vremenu zanemariti:

$$\frac{\Delta U_{KV}}{\Delta I_a} = L_p^* k_m \omega + \Sigma R \quad (10.1.61)$$

Skok armaturne struje povećava pobudni fluks koji povećava E (zbog promene U_{KV}) što predstavlja dobru osobinu rednog motora.

Posmatrajmo sada istu šemu sa R_s :



Slika br.11.1.19. Raspodela priraštaja struje prilikom šantiranja pobudnog namotaja u slučaju da je šantu zanemarljiva induktivnost

Ako R_s nema induktivitet, sav porast armature struje u prvom trenutku prolazi kroz R_s (jer se L_p protivi promeni struje). Znači da se struja kroz pobudni namotaj neće promeniti pa se neće povećati fluks. Usled toga je u prvom trenutku tranzijentna impedansa proporcionalna ΣR , odnosno, doći će do velikog udara struje. Promena napona od 10% uzrokovala bi pet puta veću struju (zbog male ulazne impedanse). To ne sme da se dopusti pa se zato u R_s ugrađuje induktivnost L_s , takva da je vremenska konstanta:

$$\tau_{\text{sant}} = \frac{L_{\text{sant}}}{R_{\text{sant}}} \approx \tau_p = \frac{L_p}{R_p} \quad (10.1.62)$$

U ovom slučaju se promene struje ravnomerno dele na L_s , R_s i L_p , R_p . Sa induktivnim šantom pri svakom strujnom udaru deo struje se preusmerava u pobudni namotaj, zbog čega raste fluks pobude pa i elektromotorna sila, i uspostavlja se balans sa naponom napajanja. Dakle, nema opasnosti od strujnog udara.

Polazne karakteristike rednog motora su bolje od karakteristika kolektorskog motora (redni motor koji se napaja naizmeničnom strujom). Polazne struje ne mogu biti veće od 2 do 2,5 puta nominalne, pa samim tim i polazni momenti su mali (ograničenje polazne struje je zbog mogućnosti pojave luka na kriškama komutatora).

Rad u oblasti slabljenja polja: ovi motori ne mogu raditi na brzinama koje su veće od 2 do 2,5 puta od nominalne, a i ovo zbog komutacije - pri velikim brzinama ulazi se u oblast u kojoj može doći do pojave “kružne vatre”(brzina prelaska četkica preko kriški je suviše velika).

Komutacija struje je jedna od najvažnijih pojava u jednosmernim mašinama, i u suštini predstavlja proces reverziranja odnosno kompletne promene smera struje u jednom ili više navojaka. Ova pojava se dešava u navojku prilikom njegovog prolaska kroz neutršanu zonu, tj. prolaska iz oblasti jednog pobudnog kola (jednog pola) u oblast drugog.

U procesu komutacije navojak je jednog trenutka kratko spojen, tj. zatvoren je sam u sebe preko lamela i četkica. Po završetku komutacije kroz navojak je promenila smer i struja i indukovana *ems*.

Sada će se nešto reći o linearnoj komutaciji.

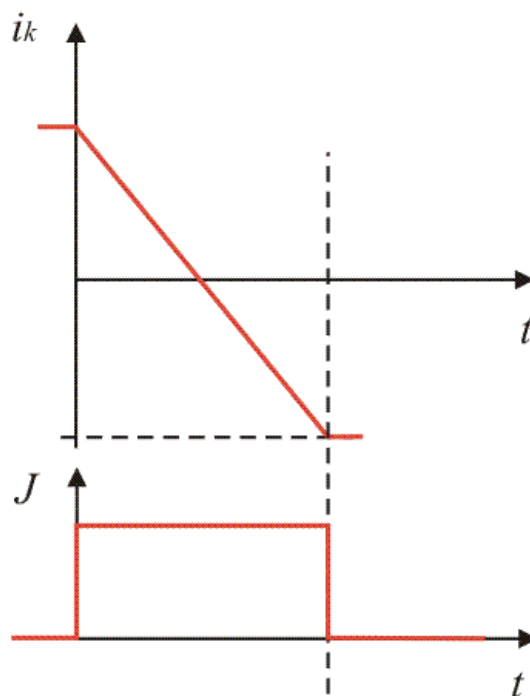
Najgrublja aproksimacija koja se pravi, zbog uprošćenja proračuna, prilikom razmatranja komutacije je da je gustina struje na dodirnoj površini lamela - četkica, konstantna (uslov za dobru komutaciju). Struja u navojku podvrgnutom komutaciji postaje od vrednosti $+I/2$ na linearan način nova, negativna vrednost $-I/2$. Međutim, ako su nam potrebni precizniji proračuni moramo voditi računa o električnim pojavama koje prate tok komutacije, kao i o osobinama materijala i kliznog kontakta. Videćemo da uslovi pri komutaciji nisu tako idealni i da odstupaju od linearnih. Smanjivanje linearnosti pogoršava komutaciju i to se prvenstveno ogleda u pojavi jakog varničenja. Tada mogu nastati dva slučaja:

- 1) struja se menja sporije, tj. dolazi do usporene ili podkomutacije;
- 2) struja se menja brže, tj. dolazi do ubrzane ili nadkomutacije.

U oba ova slučaja može da se desi da u trenutku T_k završetka komutacije, tj. kad lamela izgubi kontakt sa četkicom, struja nema vrednost $-I/2$, već, ako je podkomutacija veću, a ako je nadkomutacija manju vrednost.

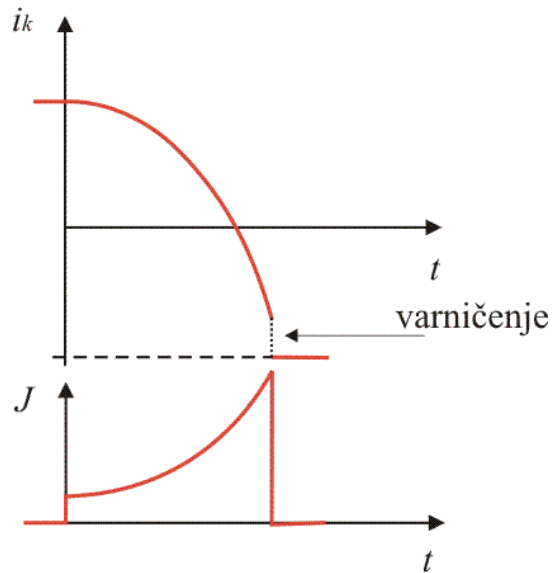
Ispravno stanje, tj. stanje u kome je struja jednaka $-I/2$ će se sigurno uspostaviti što znači da će struja u kolu morati skokovito da se promeni. Energetski gledano, ovakva promena struje u navojku nije moguća (strujan inertnost kola - induktivnosti) pa dolazi do kvazi - skokovite promene u vidu električnog luka ili varnice koja se javlja između ivice četkice i ivice lamele koja se napušta.

Na slici se vidi struja komutacije i_k i gustina struje J kada je komutacija linearna:



Slika br.11.1.20. Linearna komutacija

Kada komutacija nije linearna imamo sledeću sliku:



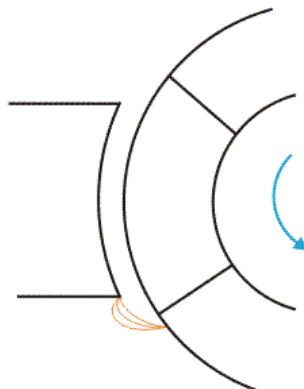
Slika br.11.1.21. Nelinearna komutacija

Varničenje je mera dobre komutacije. Kod idealne linearne komutacije varničenje je svedeno na nulu. Linearizaciju komutacije vršimo na sledeće načine:

- postojanje indukcije u neutralnoj zoni vazdušnog procepa treba poništiti putem pomoćnih polova koji su ujedno i sredstvo za suzbijanje reakcije indukta,
- potrebno je što više povećati otpornost kontakata a to se ostvaruje pogodnim izborom adekvatnog materijala za četkice i lamele (tvrdi ugljen, prirodni grafit, elektrografit, metalografit).

U slučaju da imamo nelinearnu (lošu) komutaciju dolazi do intenzivnog varničenja, koje se može, u slučaju velikog opterećenja, pretvoriti u električni luk, koji može da obuhvati čitav obim komutatora. Ta se pojava naziva “kružna vatra” i predstavlja kratak spoj (putem preskoka) između priključaka mašine.

Mesto varničenja na komutatoru prikazano je na slici:



Slika br.11.1.22. Varničenje usled nelinearne komutacije može dovesti do kružne vatre koja oštećuje motor

Kružna vatra se može javiti i u ustaljenom stanju i normalnom opterećenju ako komutator nije čist. Izolacija između lamela kolektora je na bazi liskuna i relativno je male debljine $(0,5 \div 1,5)mm$. Kada su normalni uslovi, izolacija izdržava male napone koji se javljaju tokom komutacije, međutim, ako se između lamela nakupi prašina od uglja i bakra, formiraće se nestabine strujne putanje koje čas provode a čas prekidaju struju, stvarajući tako uslove za luk, jer je kolo rotora sačinjeno od intuktivnosti, pa svako naglo prekidanje i uspostavljanje struje dovodi do $e=di/dt$, dakle do visokih napona koji dovode do pojave električnog luka.

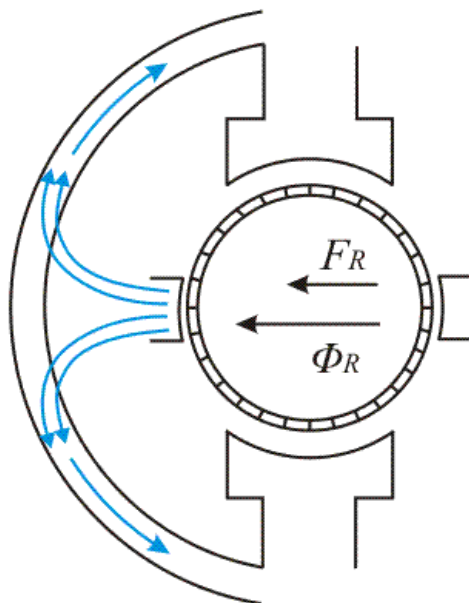
U ovom stanju je mašini zabranjen rad jer se opterećuje i mreža iz koje se mašina napaja i oštećuje se kolektor. Jednačina naponskog balansa u navojku koji komutuje:

$$L_{\gamma} \frac{di}{dt} + Ri = E \quad (10.1.63)$$

R je u ovom slučaju jako malo pa sledi:

$$L_{\gamma} \frac{di}{dt} = E \quad (10.1.64)$$

Kroz provodnike na rotoru teče armaturna struja. Kroz stator, pored fluksa pobude ϕ_P , “teče” i fluks reakcije indukta ϕ_R . Postoji mogućnost zasićenja.

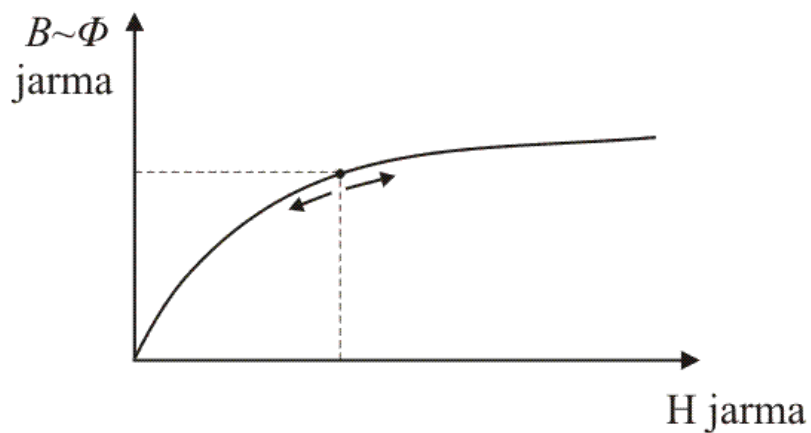


Slika br.11.1.23. Tokovi flukseva pobude i reakcije indukta u magnetnom kolu.

F_R je magnetopobudna sila reakcije indukta, a R_μ je otpor magnetnog kola.

$$\phi_R \sim \frac{F_R}{R_\mu} \quad (10.1.65)$$

Ako fluks pobude opada opadaće i indukcija.



Slika br.11.1.24. Karakteristika magnećenja

Ulaskom u zonu slabljenja polja fluks mora biti obrnuto srazmeran brzini da bi *ems* ostala u granicama nominalnog napona. Fluks opada tako da se tačka na karakteristici kreće prema koordinatnom početku.

Ulaskom u linearni deo dolazi do demagnetizacije magnetnog kola (pobudni fluks se smanji pa “postoji više mesta” za fluks reakcije indukta), tj. R_μ opada, pa prema tome fluks reakcije indukta raste čime se narušavaju uslovi za linearnu komutaciju. U realnom radu sa slabljenjem polja se ide do $40 - 60\%$ i to je mera dostizanja maksimalnih brzina (oko 2 do $2,5\omega_n$). Pri većem slabljenju polja došlo bi do problema sa komutacijom.

Nešto ćemo reći o električnom kočenju rednog motora jednosmerne struje.

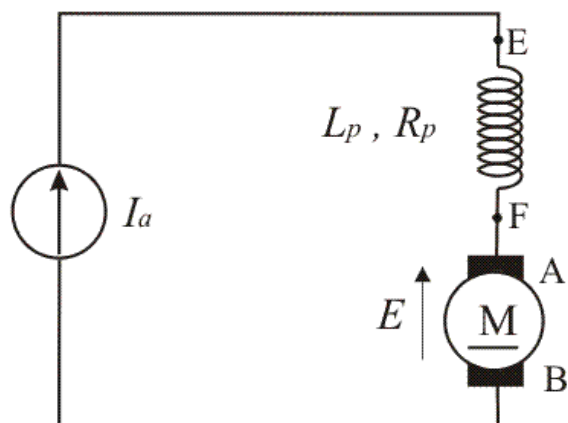
Poznata je sledeća konstatacija:

$$M \sim \phi I_a \sim I_p I_a \quad (10.1.66)$$

Ako se ne promeni način napajanja neće doći do promene smeru momenta:

$$I_a = I_p \Rightarrow M \sim I_a^2 \quad (10.1.67)$$

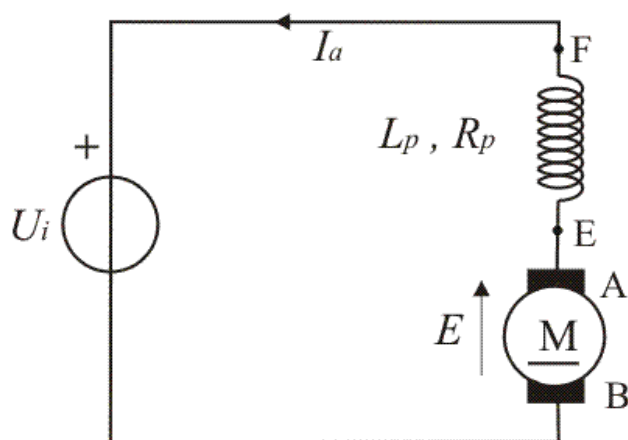
Vidimo da bez obzira da li struja menja znak, nema promene momenta. Posmatraćemo sledeću šemu:



Slika br.11.1.25. Zamenska šema JS motora u motornom režimu

Da bi se kočenje ostvarilo potrebno je ostvariti negativan momenat. Jedan od namotaja mora da poseduje mogućnost prevezivanja, odnosno da bude $I_a = -I_p$, pa ćemo imati električno kočenje. Ovo je moguće, ali se retko koristi jer je rad ove mašine u generatorskom režimu nestabilan.

Promenom mesta G i F krajeva sa prethodne slike, struja I_a sada ide od G ka F i pri tome se energija vraća izvoru:



Slika br.11.1.26. Zamenska šema JS motora u slučaju električnog kočenja (pobudni namotaj je prevezan)

Jednačina naponskog balansa za ovo kolo je:

$$E = (R_a + R_p) \cdot i + L_p \cdot \frac{di}{dt} + U_i \quad (10.1.68)$$

$$E = k_e \cdot L_p^* \cdot i \cdot \omega = (R_a + R_p) \cdot i + L_p \cdot \frac{di}{dt} + U_i \quad (10.1.69)$$

U samom pobudnom namotaju polaritet fluksa ostaje isti (obrnuli smo namotaj, ali se promenio i smer struje), pa je pozitivni kraj ostao na priključku A , tj. smer ems E ostaje isti. Drugim rečima, prevezali smo i namotaj pobude (da bi kada se promeni smer struje, smer fluksa ostao nepromenjen) i namotaj indukta (da bi smo dobili kočioni momenat – struju u suprotnom smeru). Inače, nije preporučljivo menjati smer pobude (fluksa) u JS motoru. Može se desiti da ista pobuda ne proizvede isti fluks u suprotnu stranu, tj. magnetna permeabilnost može biti veća u jednom smeru nego u drugom ako je mašina pre toga dugo radila sa pobudom u jednom smeru.

$$(R_a + R_p - k_e \cdot L_p^* \cdot \omega) \cdot i + L_p \cdot \frac{di}{dt} + U_i = 0 \quad (10.1.70)$$

Nakon primene Laplasove transformacije dobija se:

$$I(s) = \frac{-U_i(s)}{L_p \cdot s + (R_a + R_p - k_e \cdot L_p^* \cdot \omega)} \quad (10.1.71)$$

Kritična brzina je ω_{KR} :

$$\omega_{KR} = \frac{R_a + R_p + [R_K]}{k_e \cdot L_p^*} \quad (10.1.72)$$

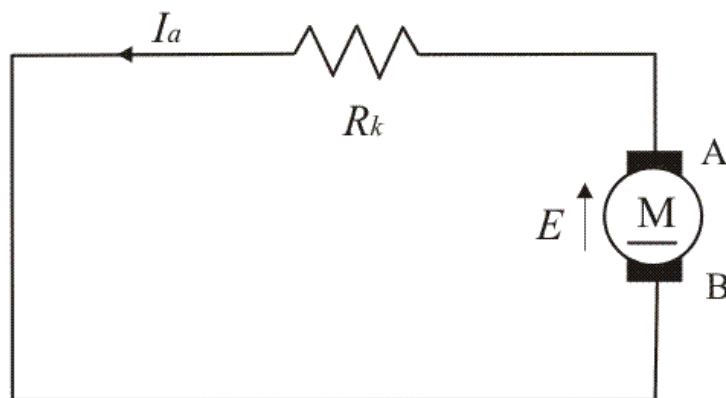
gde je R_K kočioni otpor ako je dat.

Odziv gornje funkcije u vremenskom domenu je za ω_{KR} *exp* rastuća $e^{\frac{t}{\tau}}$ funkcija, što za posledicu ima da električno kočenje treba koristiti samo pri malim brzinama,

manjim od kritične. Ovo kočenje možemo koristiti i u slučajevima kada je glavno magnetno kolo duboko zasićeno jer se tada fluks ne menja u zavisnosti od promene pobudne struje, tj. član $k_e L_p^* \omega$ je konstantan i vrlo je mali.

Pri dinamičkom (otporničkom) kočenju mehanička energija se konvertuje u toplotnu na posebnim otpornicima koji služe za ovaj način kočenja. Potreba za dinamičkim kočenjem je uglavnom zbog ograničenja receptivnosti kontaktne mreže (sposobnosti kontaktne mreže da primi struju rekuperacije). Pretpostavka injektovanja struje rekuperacije u mrežu zasnovana je na tome da na mreži postoji još vozila koja rade u motornom režimu. Ako drugog takvog vozila na trasi nema, receptivnost je jednaka nuli.

Rekuperativno kočenje je veoma otežano jer je redni motor jednosmerne struje u generatorskom režimu nestabilan. Iznad kritične brzine nije moguće rednim motorom ostvariti rekuperativno kočenje, a ni dinamičko. Stabilno kočenje je moguće samo ako je magnetno kolo zasićeno. U zoni slabljenja polja kočenje nije stabilno. Više se koristi dinamičko i protivstrujno kočenje. Pošto je kritična brzina mala dinamičko kočenje se vrši samo za konstantnu maksimalnu vrednost fluksa. Tada su karakteristike motora jednake motoru sa nezavisnom pobudom.



Slika br.11.1.27. Zamenska šema JS motora u režimu dinamičkog kočenja

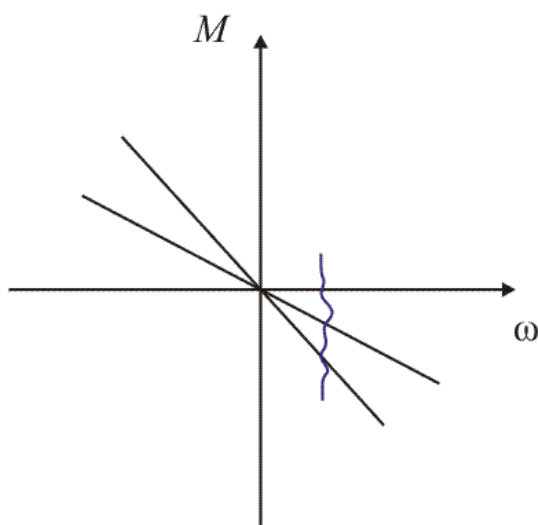
$$E = k_e \phi_{\max} \omega = \Sigma R \cdot I_a \quad (10.1.73)$$

$$I_a = \frac{k_e \phi_{\max} \omega}{\Sigma R} \quad (10.1.74)$$

Struja je suprotnog smera od referentnog za armaturnu struju. ΣR je suma svih otpora (armature, pobude, itd.). Momenat u režimu kočenja je:

$$M_{em} = -\frac{k_m k_e \phi_{\max}^2 \omega}{\Sigma R} \quad (10.1.75)$$

Za određenu brzinu kočioni momenat se menja promenom otpora, čime se menja nagib krive. Nagib krive bi se mogao menjati i promenom fluksa ali fluks je postavljen na maksimalnu vrednost koja je nominalna.

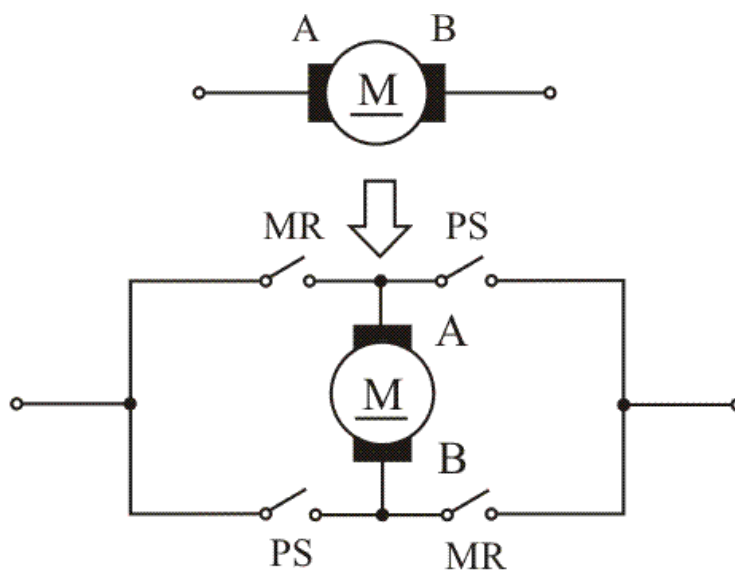


Slika br.11.1.28. Promenom otpora reguliše se kočioni momenat odnosno radna tačka

Varijacijom otpora R_k dobija se familija karakteristika u II i IV kvadrantu. Pri brzinama većim od nominalne strmina karakteristike bi se menjala promenom fluksa jer e_{ms} ne sme da bude veća od nominalnog napona.

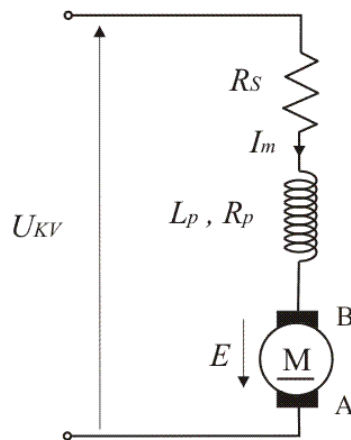
Električna energija se pretvara u toplotu na R_k . Regulacija vučne sile se obavlja diskontinualno isključivanjem segmanata otpornika. Ovo kočenje je disipativno i korisno je jer se ne koči mehanički. Nema trošenja kočionih obloga, [niti skupog održavanja](#).

Mana ovog načina kočenja je što vozilo ne može da se zaustavi. Ako se brzine smanjuju, momenat kočenja se smanjuje. Za brzinu jednaku nuli, kočioni momenat je nula, pa se ne može obezbediti ulazak voza u stanicu i njegovo zaustavljanje. Zbog toga se koristi protivstrujno kočenje pri samom ulasku u stanicu. Ono se realizuje ukrštanjem armaturnog i pobudnog namotaja. **Odlikuju ga veoma velike vrednosti struja jer se sada *ems* motora sabira sa naponom.** Uključenjem pojedinih prekidača, kao na narednoj slici, obezbeđuje se motorni rad (*MR*) ili protivstrujno kočenje (*PS*).



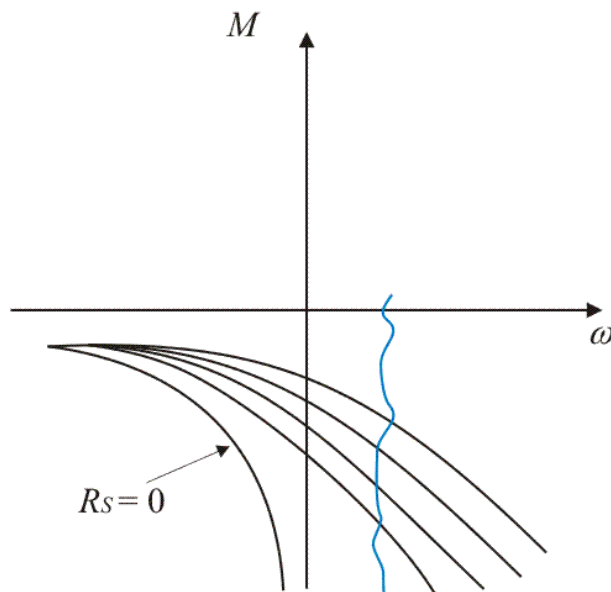
Slika br.11.1.29. Način prevezivanja armaturnog namotaja

Prelasku na protivstrujno kočenje prethodi beznaponsko stanje, pa ovim prekidačima nisu potrebni duvači električnog luka.



Slika br.11.1.30. Zamenska šema rednog motora JS u režimu protivstrujnog kočenja

Za vrlo male brzine promenom R_S može se promeniti kočioni momenat. Dobijaju se sledeće karakteristike:



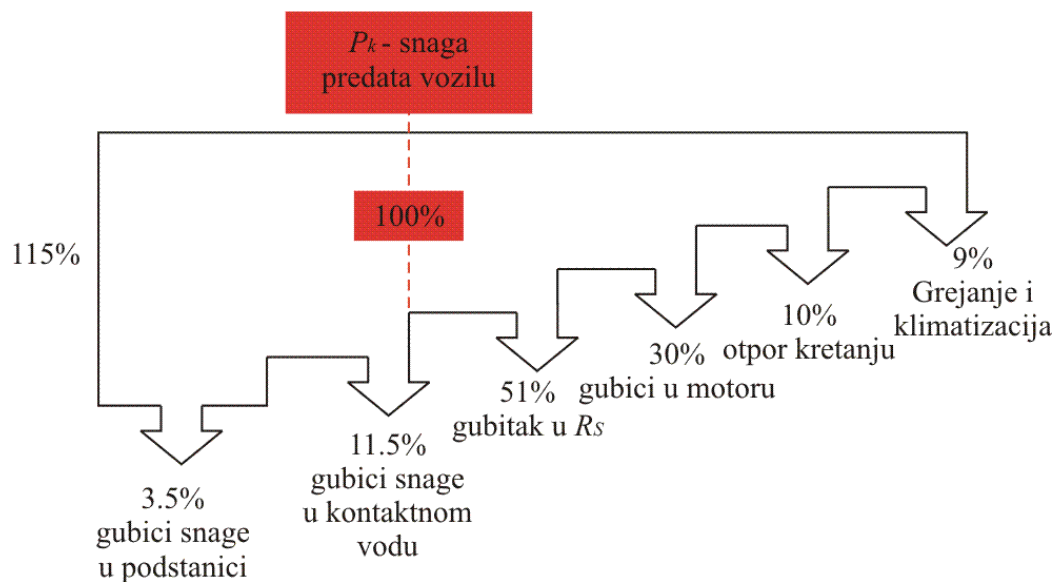
Slika br.11.1.31. Familija mehaničkih karakteristika pri protivstrujnom kočenju

Snaga koja se ulaže u sistem preko osovine i snaga iz izvora se troše na otporniku, koji se zato mnogo greje. Zbog toga je u energetskom pogledu ovo kočenje loše, pa se primenjuje u fazi potpunog zaustavljanja vozila (nekoliko sekundi).

Može se zaključiti da je jednostavnost reostatske kontrole vučne sile njena dobra osobina, a pored toga dobro je i što nema teškoća vezanih za vučne pretvarače

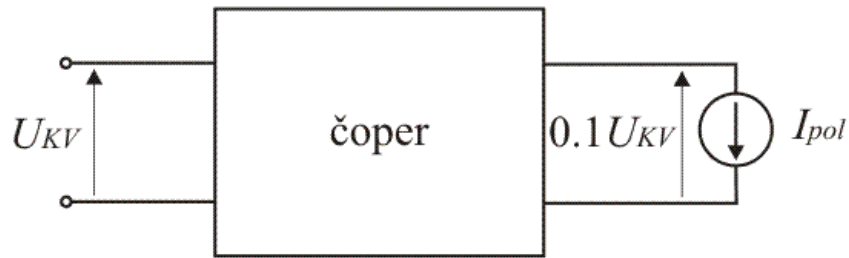
(problemi sa komutacionom učestanošću, smetnjama, hlađenjem poluprovodnika, itd.). Kao mana može se izdvojiti nepovoljan energetska bilans. Vučna sila je impulsnog karaktera zbog korišćenja otpornika sa segmentima. Zbog toga se ne može razviti tako velika vučna sila kao kad bi bila kontinualna i to zbog adhezije, jer srednja vrednost vučne sile mora biti manja od maksimalno moguće usled opasnosti od proklizavanja. Udobnost putovanja je malo lošija. Takođe, kraća je dužina rada bez kvara elemenata u odnosu na način nedisipativne regulacije pomoću energetskih pretvarača. Puno je kontaktora, duvača električnog luka, pa je održavanja teško.

Na sledećoj slici grafički se prikazuju podaci koji se odnose na srednju vrednost snage svih motornih kola podzemne železnice u jednom gradu u toku jedne godine, kod kojih se vučna sila reguliše reostatski:



Slika br.11.1.32. Tok snaga

Očekivano je da gubici u R_s budu veliki jer su periodi vožnje stalnom brzinom kratki. Kod reostatske kontrole celokupna polazna struja motora povlači se iz mreže. U slučaju korišćenja čopera, struja koja se povlači iz mreže nije tako velika:



Slika br.11.1.33. Principijelna šema čopera

Pod pretpostavkom da čoper nema gubitaka:

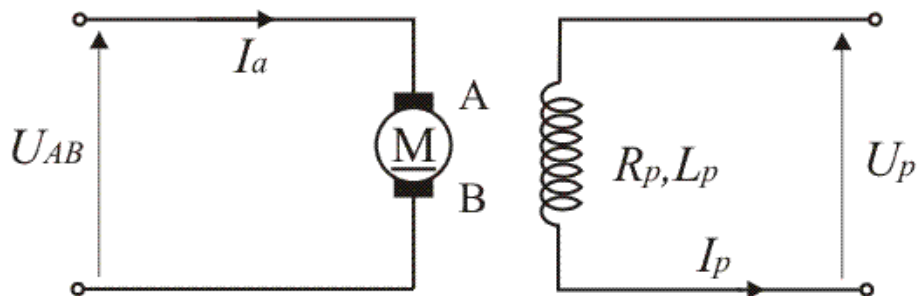
$$I_{kv} = \frac{U_{izl}}{U_{ul}} I_{izl} \Rightarrow I_{kv} = 0,1 \cdot I_{pol} \quad (10.1.76)$$

Da bi se izbegle velike polazne struje u slučaju reostatske kontrole, pribegava se rednom i paralelnom sprezanju motora.

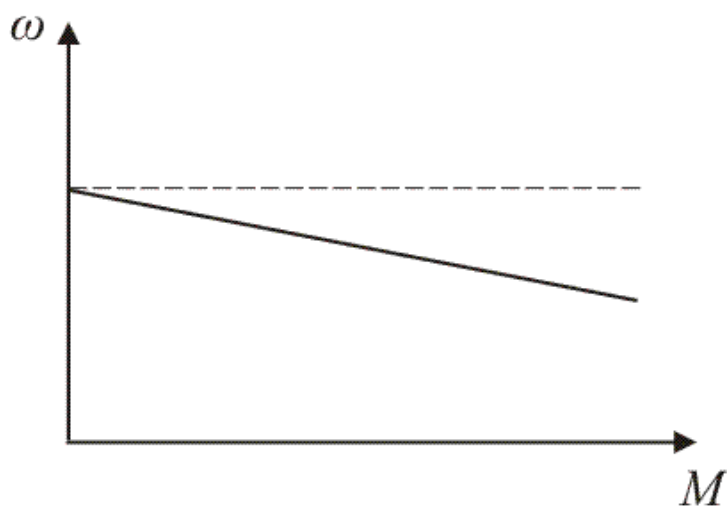
11.1.b Motor jednosmerne struje sa nezavisnom pobudom

Glavna prednost motora jednosmerne struje sa nezavisnom pobudom u odnosu na redne motore jednosmerne struje je u tome što kod rednih motora proklizavanje nije stabilno, dok kod onih sa nezavisnom pobudom to nije slučaj.

Šematski prikaz ovog motora i njegova mehanička karakteristika dati su na sledećoj slici:



Slika br.11.1.34.(a) Zamenska šema motora JS sa nezavisnom pobudom



Slika br.11.1.34.(b) i njegova mehanička karakteristika

Ovaj motor je u svemu identičan sa rednim motorom, izuzev pobude koja je drugačije realizovana. Nezavisna pobuda koja se ovde primenjuje čini nemogućom reostatsku regulaciju brzine. Na karakteristici je:

$$\omega_0 = \frac{U}{k_e \cdot \phi_p} \quad (10.1.77)$$

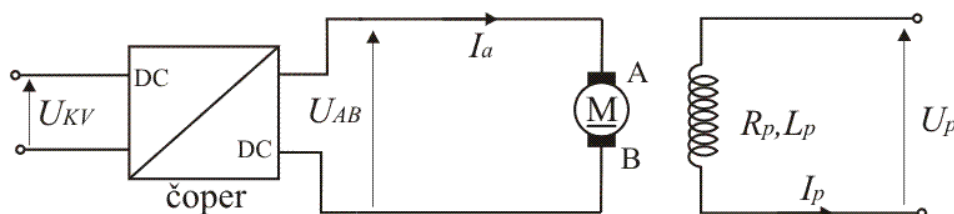
pa se karakteristika može pomerati promenom ϕ_p ili U . Takođe je strmina karakteristike proporcionalna:

$$S = \frac{\Delta M}{\Delta \omega} \sim \operatorname{ctg} \Delta \theta \sim \frac{\phi_p^2}{\Sigma R} \quad (10.1.78)$$

Vidimo da je za regulaciju brzine potrebno menjati ili ϕ_p ili U . Promenu napona, označenog na narednoj slici sa U_m , u kontinualnom opsegu:

$$U_m \in [0, U_{KV}] \quad (10.1.79)$$

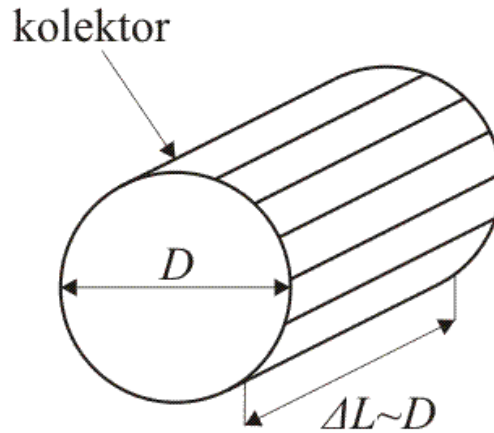
moгуće je izvršiti samo uz postojanje takozvanog vučnog čopera, koji je opisan i objašnjen u narednim poglavljima posvećenim nedisipativnoj, čoperskoj regulaciji vučne sile (ne gubi se energija).



Slika br.11.1.35. Principijelna šema napajanja motora JS čoperom

Primenom ove realizacije nemamo problema sa udarima usled promene U_{KV} , kao ni sa promenom uspona jer je sve to moguće amortizovati pomeranjem karakteristike.

Mašine jednosmerne struje sa rednom i nezavisnom pobudom se sve manje i manje primenjuju jer je njihova težina veća od ekvivalentne težine mašina naizmenične struje. Takođe, nije moguće napraviti vučni motor jednosmerne struje velike snage. Dakle, prisutno je ograničenje dimenzija mašine. Na slici je prikazan kolektor i oznake njegovih dimenzija:



Slika br.11.1.36. Kolektor motora JS

Napon između kriški komutatora srazmeran je D :

$$E_{AB} \sim D. \quad (10.1.80)$$

Struja I_a je ograničena maksimalnom dozvoljenom gustinom struje na kontaktu četkica i kolektora:

$$I_a \sim \Delta(D^2). \quad (10.1.81)$$

Kao posledica toga javlja se ograničenje snage jer je

$$P \sim D^3. \quad (10.1.82)$$

Zbog centrifugalnih sila, kolektor ne može biti veliki za velike brzine jer je centrifugalna sila srazmerna proizvodu $D\omega^2$. Veći prečnik za posledicu ima manju dozvoljenu brzinu mašine:

$$\omega^2 \sim \frac{1}{D} \quad (10.1.83)$$

Imamo dva uzajamno suprotna zahteva:

- da povećamo D da bismo dobili veću snagu ($P \sim D^3$),

- da smanjimo D da bismo dobili veću maksimalno dozvoljenu brzinu.

Zato postoji konstruktivno ograničenje tzv. “ Pn ” proizvod:

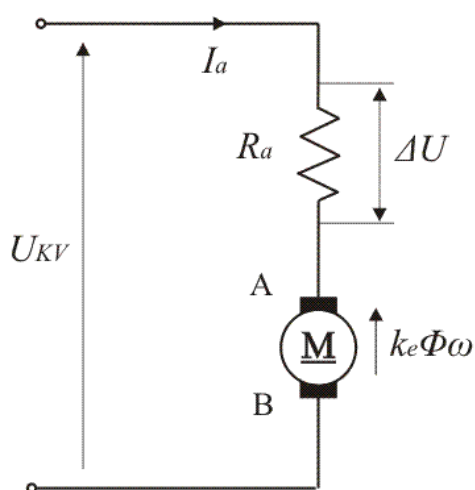
$$P \cdot n \approx 1 [MW] \times 1000 \left[\frac{ob}{min} \right] \quad (10.1.84)$$

Ovo je praktično veza između veličine motora (D) i momenta koji on može da razvije (a ne snage).

12 Nedisipativna regulacija vučne sile uz pomoć čopera

Energetski bilans pri zaletanju bi bio mnogo povoljniji ukoliko bi se vučna sila regulisala promenom napona napajanja na nedisipativan način. Potrebno je podesiti da napon na motoru odgovara potrebama vuče.

Posmatrajući sledeću sliku:

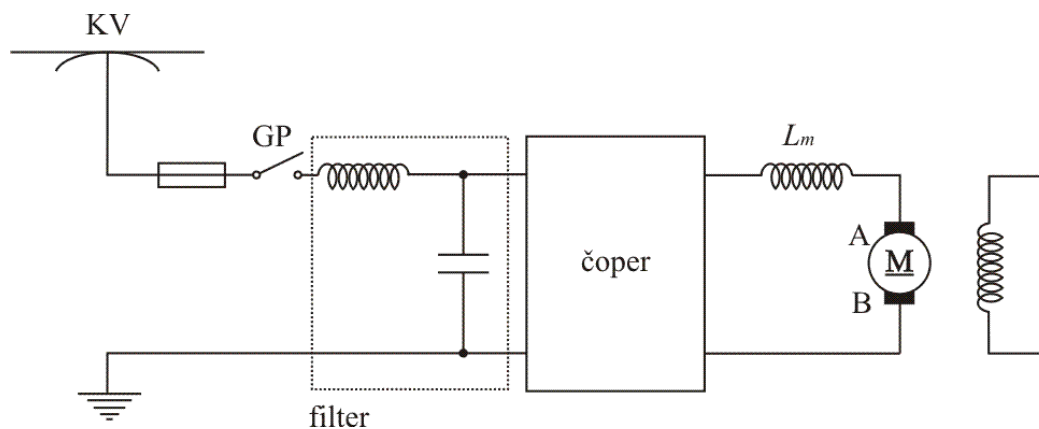


Slika br.12.1. Zamenska šema JS motora sa prikazanim padom napona na otporu indukta i indukovanom ems

vidi se da je armaturna struja proporcionalna $\Delta U/R_a$. Vučna sila je proporcionalna struji I_a .

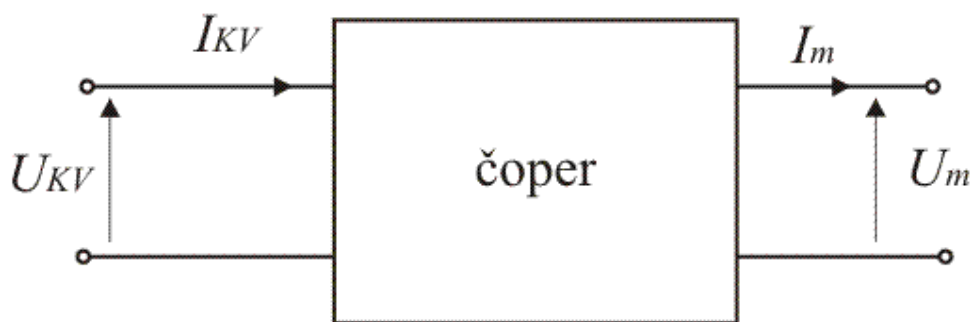
Za ostvarenje promene napona koriste se čoperi, jer oni omogućavaju $DC - DC$ konverziju bez gubitaka električne energije. Ovde ćemo zanemariti gubitke na čoperu, tako da možemo da kažemo da je koeficijent korisnog dejstva jednak jedinici, odnosno $P_m = P_{KV}$.

Osnovna ideja prikazana je sledećom slikom:



Slika br.12.2. Principijelna šema motora JS sa nezavisnom pobudom napajanog čoperom

Sam čoper se može posmatrati kao četvorokrajnik, sa ulaznim i izlaznim veličinama, kao na slici:



Slika br.12.3. Principijelna šema čopera

Osnovne tri topologije čopera, koje se razlikuju u rasporedu tri elementa - prekidača, prigušnice i diode, su:

čoper spuštač napona ("buck"),

čoper podizač napona ("boost"),

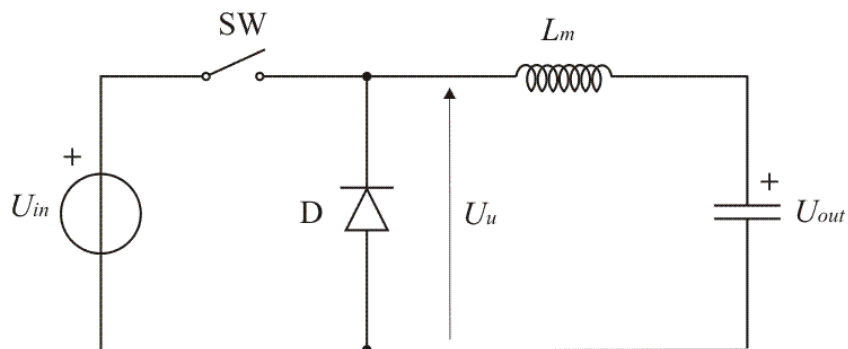
čoper obrtač napona ("buck - boost").

Čoperi prenose jednu po jednu porciju energije sa ulaza na izlaz. Trajanjem uključenosti prekidača podešava se ta količina energije. Prekidači se prave u poluprovodničkoj tehnologiji kao MOSFET, IGBT ili bipolarni tranzistori, i tiristori.

Razmotriće se osnovne karakteristike sve tri vrste čopera.

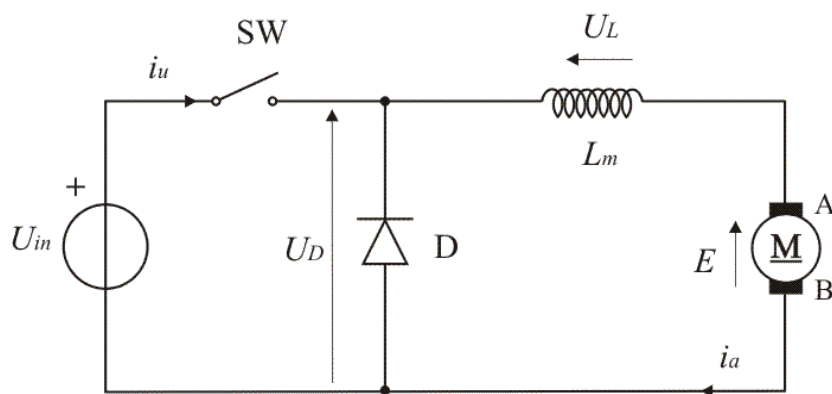
12.1 Čoper spustač napona ("buck")

Električna šema ovog čopera data je na slici:



Slika br.12.1.1. Principijelna električna šema čopera spustača napona

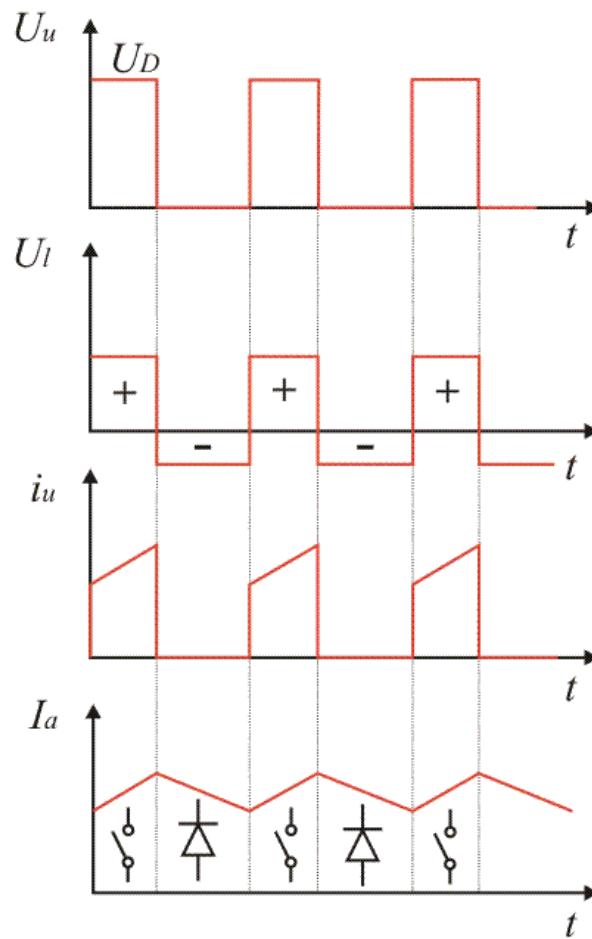
U električnoj vuči bi ta šema izgledala ovako:



Slika br.12.1.2. Napajanje motora čoperom spustačem napona

Uzima se da su vrednosti aktivnih otpornosti zanemarljive: $R_a, R_L \approx 0$. Prigušnica L_m je motorna prigušnica. Ona teži da održi konstantnom struju i_a .

Prekidač se uključuje i isključuje periodično. Mogu se analizirati promene napona i struja, odakle se dobijaju grafici:



Slika br.12.1.3. Vremenski oblici napona na prigušnici, napona na diodi, struje motora i struje diode

Odnos između vremena trajanja uključenosti prekidača i periode predstavlja indeks modulacije:

$$m = \frac{t_{on}}{T} \quad (11.1.1)$$

Od interesa je veza između srednje vrednosti ulaznog i srednje vrednosti izlaznog napona. U ovom slučaju to je:

$$U_{out} = mU_{in} \quad (11.1.2)$$

Struja prigušnice ima talasnost zbog toga što je praktično nemoguće ostvariti da induktivnost teži beskonačnosti. Srednja vrednost ulazne struje je:

$$I_{ul_sr} = mI_L \quad (11.1.3)$$

gde je I_L je struja prigušnice.

Snaga koja se prenosi je:

$$P = U_{in} mI_L \sim U_{in} I_L \quad (11.1.4)$$

Veličina prekidača se definiše kao suma volt-ampera: ΣVA . Kod ovog čopera ona je:

$$\Sigma VA \sim U_{in} I_L \quad (11.1.5)$$

Elektromotorna sila je u balansu sa srednjom vrednosti ulaznog napona:

$$U_m = R_a I_a + k_e \phi \omega \quad (11.1.6)$$

Zanemarenjem R_a dobija se:

$$E = k_e \phi \omega \approx m U_{KV} = U_m$$

Ovim čoperom vrši se kontinualno podešavanje napona motora od nule do vrednosti ulaznog napona.

Izborom indeksa modulacije menja se napon na motoru. Tako imamo, uz uvažavanje R_a :

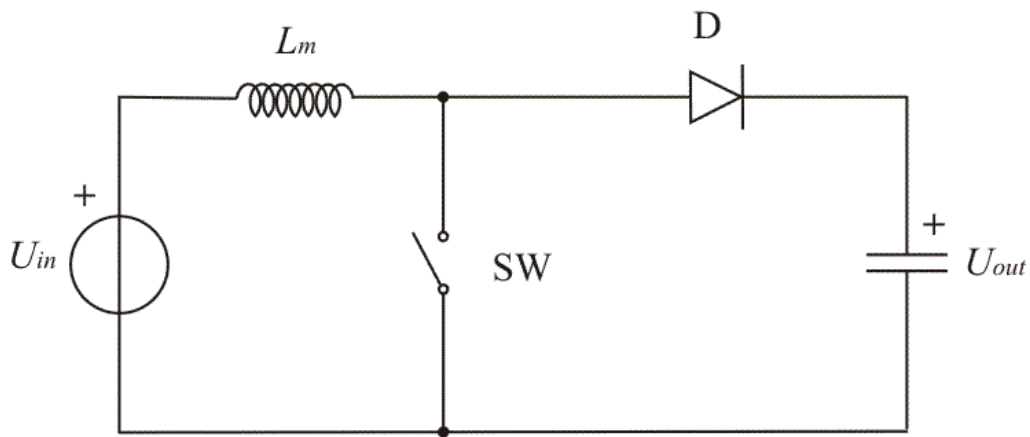
$$m > \frac{k_e \phi \omega}{U_{KV}} \Rightarrow I_a > 0, M > 0 \quad (11.1.7)$$

$$m < \frac{k_e \phi \omega}{U_{KV}} \Rightarrow I_a < 0, M < 0 \quad (11.1.8)$$

Valovitost struje kroz motor je neprijatna. Ona zavisi od napona napajanja (koji ne može da se bira), učestanosti komutacije i vrednosti induktivnosti prigušnice. Ako je učestanost komutacije u blizini čujnog opsega dolazi do pulsacije fluksa, što dovodi do magnetostrikcije i proizvodnje zvučnih talasa koje čovek može da čuje [što predstavlja dodatnu nelagodnost](#).

12.2 Čoper podizač napona ("boost")

Električna šema ovog čopera data je na slici:



Slika br.12.2.1. Principijelna električna šema čopera podizača napona

Njime se vrši kontinualno podešavanje izlaznog napona od vrednosti ulaznog napona do "beskonačnosti". Veza između srednje vrednosti ulaznog i izlaznog napona je:

$$U_{out} = \frac{U_{in}}{1 - m} \quad (11.2.1)$$

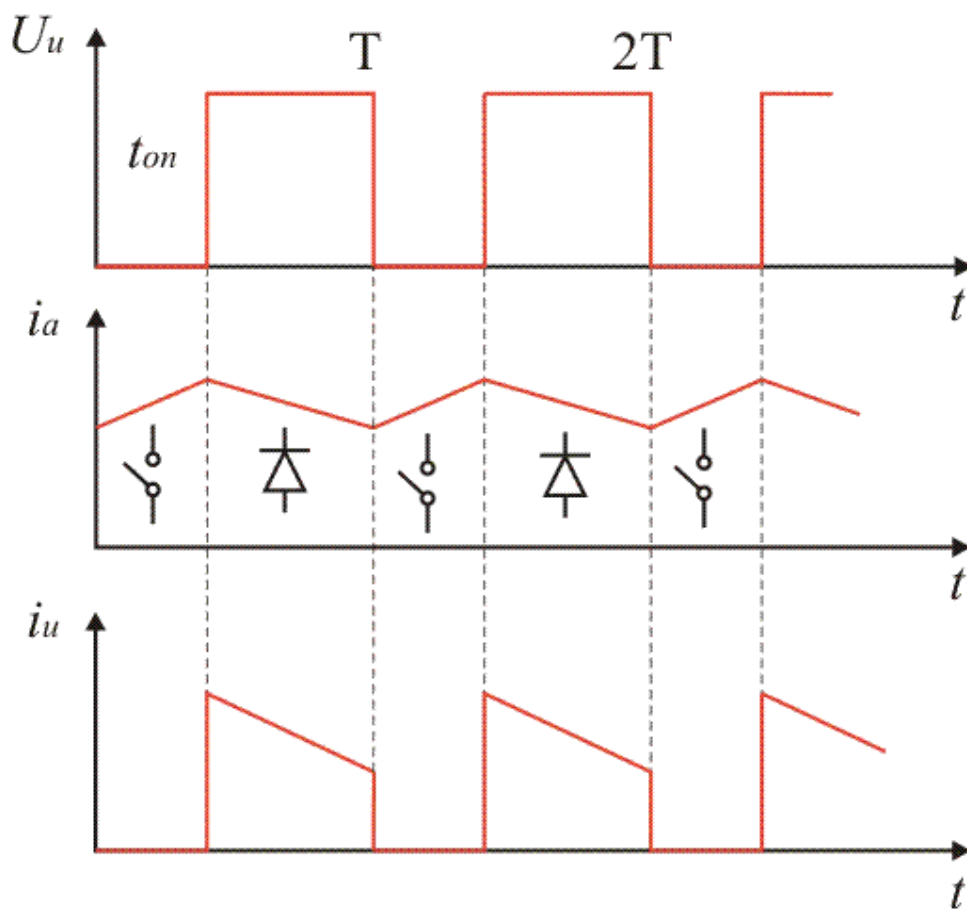
Snaga koja se prenosi je:

$$P \sim U_{in} I_L \quad (11.2.2)$$

Veličina prekidača:

$$\sum VA \sim U_{out} I_L, (U_{out} > U_{in}) \quad (11.2.3)$$

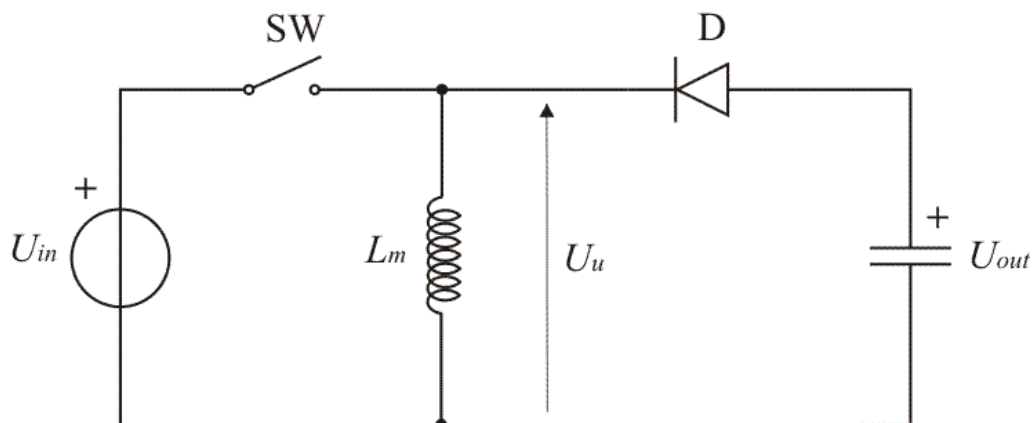
Promene napona i struja u vremenu kod ovog čopera dati su na sledećim graficima:



Slika br.12.2.2. Vremenski oblici napona i struje motora

12.3 Čoper obrtač napona ("buck - boost")

Električna šema ovog čopera data je na slici:



Slika br.12.3.1. Principijelna električna šema čopera obrtača napona

Izlazni napon može biti veći ili manji od ulaznog napona. Veza između srednje vrednosti ulaznog i izlaznog napona je:

$$U_{out} = \frac{mU_{in}}{1-m} \quad (11.3.1)$$

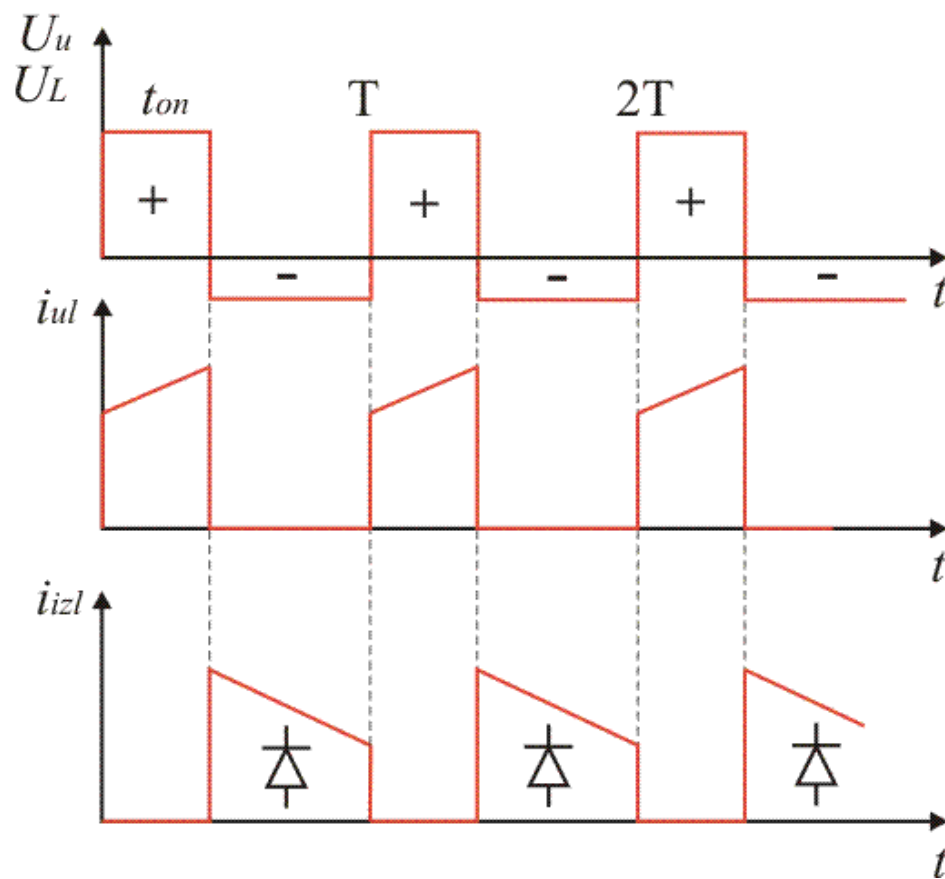
Snaga koja se prenosi je:

$$P \cong U_{in}mI_L \cong U_{out}(1-m)I_L \quad (11.3.2)$$

Veličina prekidača:

$$\sum VA \sim 2U_{in}I_L \quad (11.3.3)$$

Promene napona i struja u vremenu kod ovog čopera dati su na sledećim graficima:



Slika br.12.3.1. Vremenski oblici napona na prigušnici, ulazna struje i struje diode

U vuči se koristi najčešće čoper spuštač napona. Motor je okarakterisan nominalnim naponom koji je jednak maksimalnom trajnom naponu za koji je pravljen izolacija. Karakteristike čopera koje su bitne u električnoj vuči su dimenzije, težina, grejanje čopera (vezano za naponski i strujni kapacitet upotrebljenih prekidača). Po pitanju dimenzija najpovoljniji je spuštač napona. Obrtač napona se jedino koristi u prekidačkim izvorima napajanja.

Čoperi spuštači napona se dele na:

- čopere spuštače napona sa rekuperacijom,
- čopere spuštače napona bez rekuperacije.

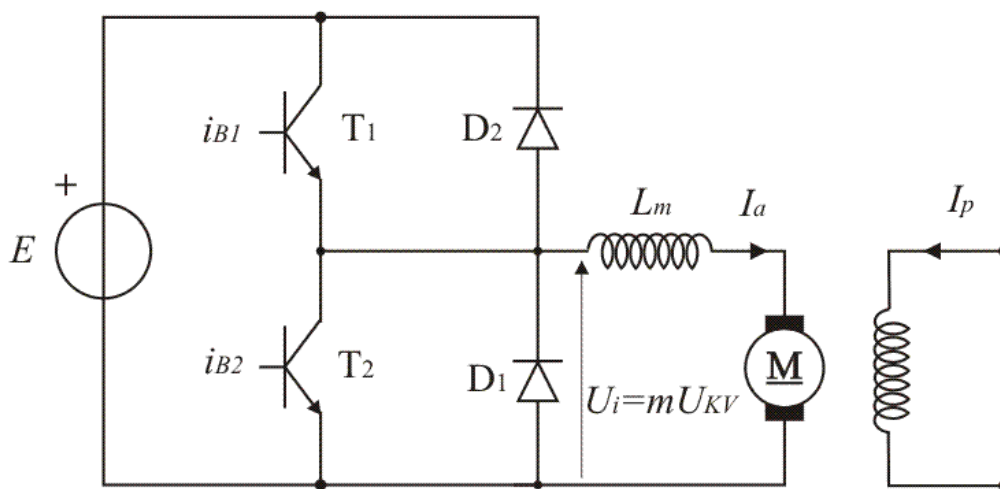
12.4 Čoper spustač napona (BACK) sa rekuperacijom (Tranzistorski vučni čoper)

Jedan od načina za kočenje je rekuperativno kočenje. Kinetička energija se kroz elektromehaničku konverziju pretvara u električnu i vraća se u izvor. Zadržava se smer fluksa da se mašina ne bi razmagnetisala. Ako je čoper dobar u njemu se vrši transformacija jednosmernog napona bez gubitaka električne energije. Promena izlaznog napona se vrši kontinualno. Važi:

$$U_{out} = \frac{t_{on}}{T} U_{in} = m U_{in}, 0 < m < 1 \quad (11.4.1)$$

$$P_{in} = U_{in} I_{in} = P_{out} = U_{out} I_{out} \quad (11.4.2)$$

Električna šema ovog čopera i veza sa motorom dati su na sledećoj slici:



Slika br.12.4.1. Principijelna električna šema čopera spustača napona sa rekuperacijom

Koristi se motor jednosmerne struje sa nezavisnom pobudom. Upotreba ovakvog kola i motora omogućava prelazak iz motornog režima u režim kočenja bez promene topologije kola. Struje u električnoj vuči su reda $100A$ pa i $1000A$, i svako

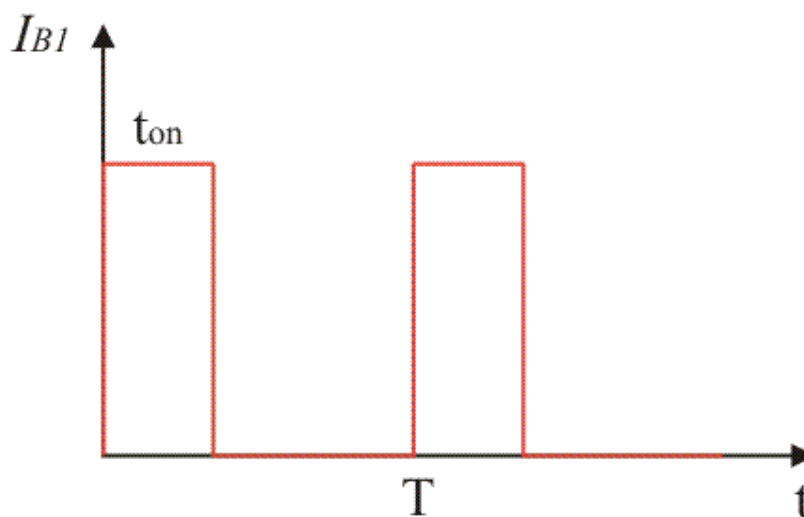
prevezivanje namotaja traži masivne nepouzđane kontaktore. Zbog toga je zadržavanje jedinstvene topologije kola odlična osobina.

U ovom slučaju u upotrebi su dva tranzistora a ne četiri, zbog toga što nam je neophodno da se obezbedi da brzina ω bude veća od nule (odnosno i napon veći od nule jer važi da je napon srazmeran proizvodu fluksa i brzine) i momenat da može da bude veći ili manji od nule (zavisno od režima rada). Momenat i struja su istog znaka jer je momenat srazmeran proizvodu fluksa i struje. Nije, dakle, potrebno da vučni motor razvija negativnu brzinu.

U motornom režimu rada u funkciji je tranzistor $T1$, dok je $T2$ neprovodan. Pobuda, odnosno impuls, na bazi tranzistora $T1$ traje:

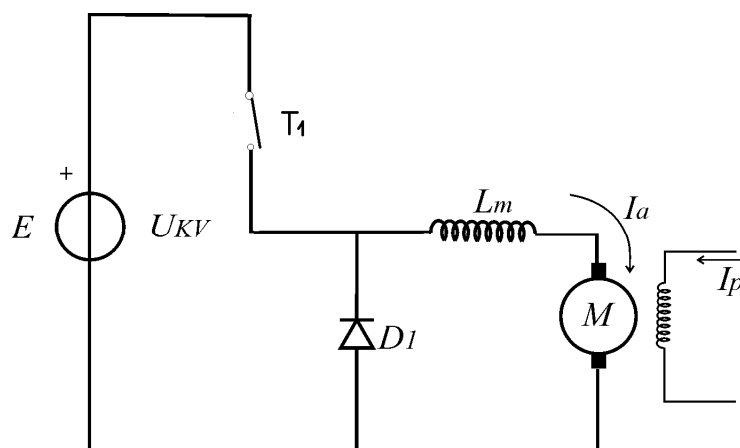
$$t_{on} = mT \quad (11.4.3)$$

i ima izgled kao na slici:



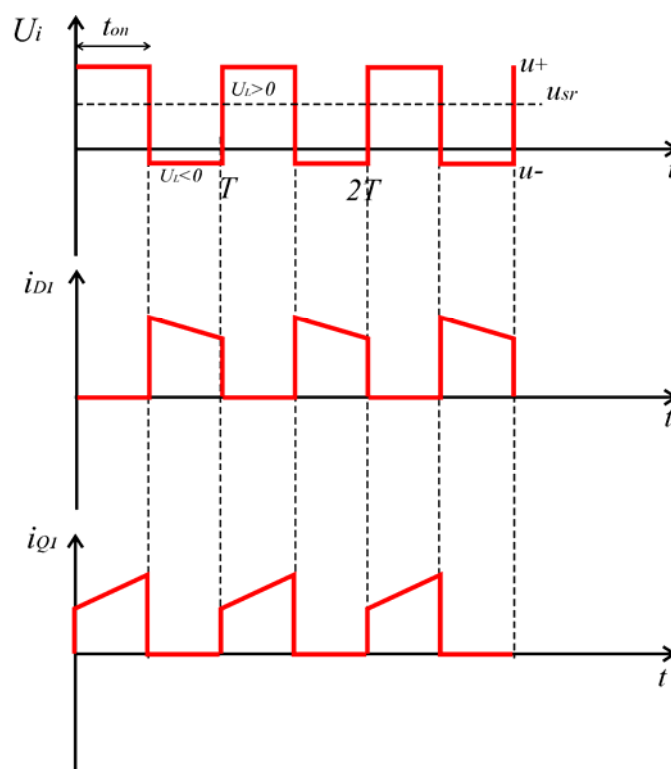
Slika br.12.4.2. Vremenski oblik bazne struje tranzistora

Dioda $D2$ je polarisana neprovodno i na njenom mestu je otvorena veza. U vremenskim intervalima u kojim tranzistor $T1$ ne provodi struja se zatvara kroz diodu $D1$. Važi, dakle, sledeća slika:



Slika br.12.4.3. Kada je tranzistor isključen struja se zatvara preko diode

Vremenski oblici napona na prigušnici, struja kroz tranzistor $T1$ i diodu $D1$, i struje kroz motor dati su na sledećim dijagramima:



Slika br.12.4.4. Vremenski oblici napona na prigušnici, struje diode i struje tranzistora

Napon na prigušnici za vreme t_{on} ima vrednost:

$$U_L^+ = U_{KV} - V_{CE_sat} - U_a \quad (11.4.4)$$

To je napon kontaktnog voda umanjen za vrednost napona saturacije između kolektora i emitera tranzistora Tl i za vrednost napona motora.

Za vreme dok Tl ne provodi, napon na prigušnici je jednak negativnom zbiru napona praga provođenja diode Dl i napona motora (pada napona na R_a i indukovanoj ems)

$$U_L^- = -V_D - U_a \quad (11.4.5)$$

Srednja vrednost izlaznog napona, označenog sa U_i , računa se na sledeći način:

$$\begin{aligned} TU_{isr} &= t_{on}U^+ + (T - t_{on})U^- \Rightarrow \\ \Rightarrow U_{isr} &= mU^+ + (1-m)U^- \end{aligned} \quad (11.4.6)$$

$$\begin{aligned} U_{isr} &= m(U_{KV} - V_{CE_sat}) + (1-m)(V_D) \rightarrow \\ \rightarrow U_{isr} &= mU_{KV} - mV_{CE_sat} + (1-m)V_D = k_e\phi\omega + R_a I_a \end{aligned} \quad (11.4.7)$$

Struja motora ima svoju srednju vrednost i oko nje osciluje sa amplitudom ΔI . Napon na prigušnici se kreće oko neke srednje vrednosti:

$$U_L = U_i - E \quad (11.4.8)$$

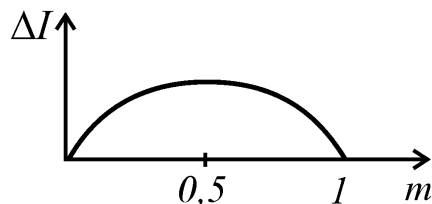
Izvod struje u vremenu iznosi:

$$\frac{di}{dt} = \frac{U_i - E}{L} \quad (11.4.9)$$

Izraz za amplitudu valovitosti struje izgleda ovako:

$$\Delta I(m) = m(1-m) \frac{U_{KV} T}{2L} \quad (11.4.10)$$

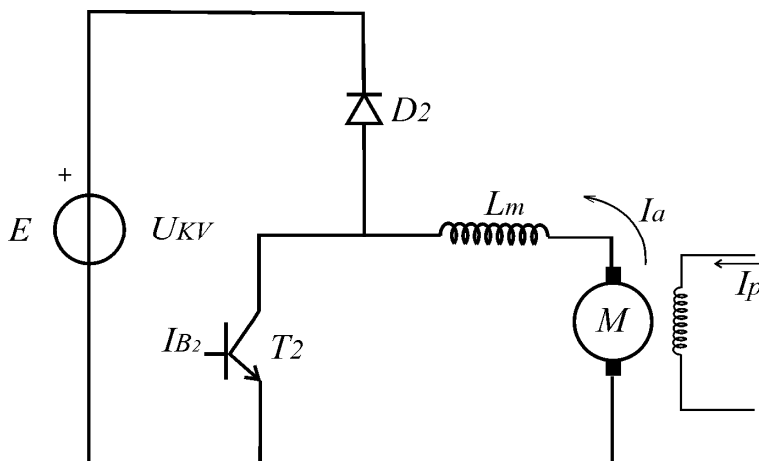
Valovitost struje zavisi od indeksa modulacije m . To je prikazano na grafiku:



Slika br.12.4.5. Zavisnost valovitosti struje od indeksa modulacije

Najveća valovitost je za $m=0,5$. Zbog toga se kod tramvaja najjači zvuk (pištanje) proizvodi pri srednjim brzinama.

U režimu kočenja u funkciji je tranzistor $T2$, dok je $T1$ neprovodan. Dioda $D1$ takođe ne provodi, a kroz diodu $D2$ teče struja za vreme dok ne provodi $T2$. Dioda $D2$ se naziva dioda za rekuperaciju. Praktično ovde važi sledeća šema:



Slika br.12.4.6. Principijelna električna šema čopera spustača napona u režimu rekuperacije

Vidi se da je to šema čopera podizača napona. Struja I_a sada menja smer. Razvija se suprotni, kočioni momenat. Tok struje, odnosno tok **energije** je suprotan prethodnom slučaju, što znači da se energija vraća u mrežu.

Napon na izlazu je:

$$U_i = mU_{KV} = k_e \phi \omega + (R_a + R_L)I_a \quad (11.4.11)$$

R_L je omski otpor prigušnice.

Oдавде se dobija izraz za brzinu:

$$\omega = \frac{mU_{KV} - (R_a + R_L)I_a}{k_e \phi} \quad (11.4.12)$$

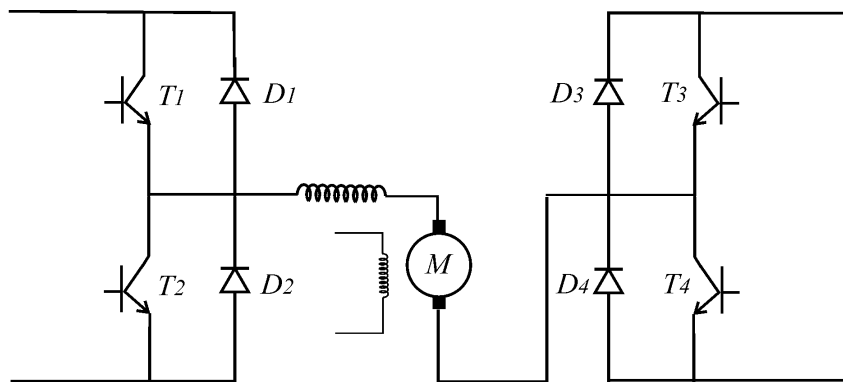
Vučna sila, a samim tim i sila kočenja, srazmerna je momentu koji je srazmeran struji I_a :

$$F_v \sim M_{em} \sim I_a = \frac{mU_{KV} - k_e \phi \omega}{R_a + R_L} \quad (11.4.13)$$

Promenom t_{on} , tj. promenom m , može se kontinualno podešavati brzina i vučna, odnosno kočiona, sila.

Veoma je važno da se pri prestanku impulsa pobude jednog i nastanka impulsa pobude drugog tranzistora sačeka nekoliko mikrosekundi da bi se potpuno izvukli svi manjinski nosioci radi sigurnosti da ne bi došlo do kratkog spoja na kontaktnom vodu (da se dogodi uključenje drugog tranzistora dok prvi i dalje vodi). Ukoliko bi postojali samo $T1$ i $D1$ ne bismo mogli vršiti rekuperaciju električne energije. Stoga su neophodni $T2$ i $D2$ (obezbeđuju promenu smera struje, pa time i energije).

Kod manipulativnih vozila mora se ostvariti mogućnost promene polariteta [napona napajanja](#) jer je neophodno obezbediti mogućnost dvosmernog kretanja. Ovo je omogućeno tzv. H mostom, koji je prikazan na slici:



Slika br.12.4.7. Veza motora i dva čopera spustača napona u takozvanom *H* mostu radi obezbeđivanja četvorokvadratnog rada.

Ovakav čoper ima dvostruko više elemenata.

Tranzistorski vučni čoper se primenjuje za manje vučne snage, do $100kW$. Za veće snage primenjuju se nerekuperativni čoperi sa tiristorima.

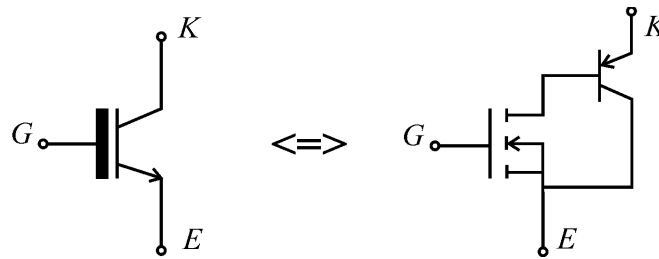
Rekuperativno kočenje obezbeđuje velike uštede električne energije. U metrou New Yorka ušteda je 20 do 30% u odnosu na dinamičko kočenje. Za ostvarenje rekuperativnog kočenja potrebna je receptivnost mreže, tj. njena sposobnost da prihvata negativnu struju kočenja bez uvećanja napona napajanja.

12.5 Praktična realizacija tranzistorskog vučnog čopera

Kod vozila za masovni transport, snaga motora je od 100 do $200kW$, a motornih kola oko $800kW$. U upotrebi su čoperi snage oko $200kW$, napona 700 do $1200V$ i struje od 300 do $1000A$.

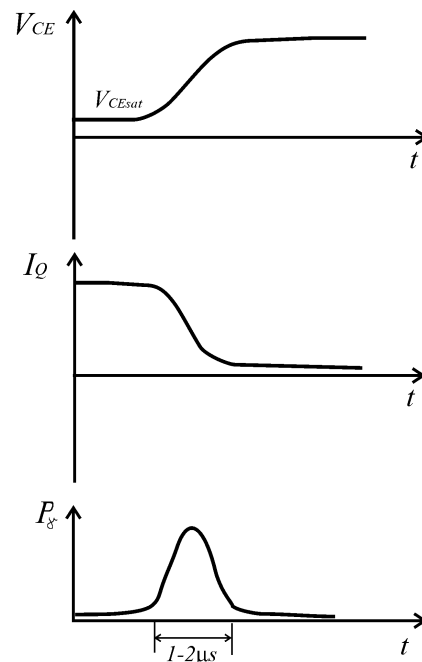
Za realizaciju tranzistorskog vučnog čopera najčešće se koriste *IGBT* tranzistori (*Insulated Gate Bipolar Transistor*)

IGBT je ekvivalentan vezi *MOSFET*-a i bipolarnog tranzistora, koja je prikazana na slici:



Slika br.12.5.1. Simbol za *IGBT* tranzistore

Posmatrajmo trenutke komutacije kada se struja i napon na tranzistoru menjaju. Tranzistor *IGBT* vodi dok je napon na gejtju veći od napona praga provođenja. Uzmimo slučaj kada tranzistor prestaje da provodi. Napon između kolektora i emitera sa vrednosti napona saturacije raste do vrednosti napona kontaktnog voda. Struja kroz tranzistor opada sa svoje ustaljene vrednosti na vrednost jako male struje curenja. Pri ovako prikazanoj komutaciji, koja traje 1 do $2\mu s$, javljaju se gubici snage. Sve ovo što je rečeno može se videti na narednim dijagramima:



Slika br.12.5.2. Vremenski oblici napona između kolektora i emitera, struje tranzistora i snaga gubitaka pri komutaciji

Da se podsetimo: Pri radu poluprovodničkih prekidača postoje dve vrste gubitaka. Jednu vrstu predstavljaju gubici pri vođenju koji predstavljaju proizvod struje kroz element, pada napona na njemu dok provodi i vremena vođenja. Drugu vrstu predstavljaju gubici pri komutaciji. Oni “greju” poluprovodnik dosta kraće vreme ali su i znatno veći.

Od učestanosti komutacije zavisi snaga gubitaka električne energije pri komutaciji:

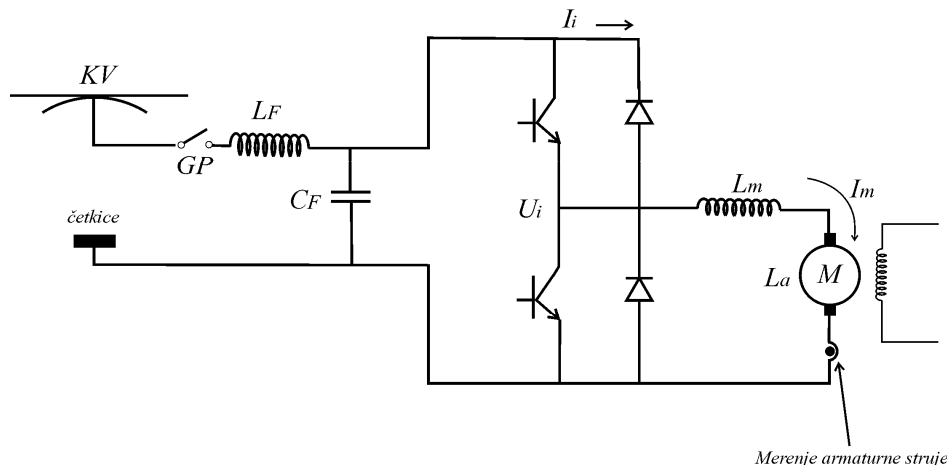
$$P_{\gamma}^{kom} = f_{kom} W_{kom} \quad (11.5.1)$$

Ako se smanji perioda

$$T = t_{on} + t_{off} \quad (11.5.2)$$

povećaće se učestanost, što znači da će se smanjiti valovitost struje. Ali, pri svemu tome dolazi do povećanja komutacione učestanosti pa će se snaga gubitaka pri komutaciji takođe povećati. Potrebno je, dakle, ići na veće učestanosti da bi se valovitost struje smanjila, ali istovremeno ubrzati komutaciju tako što će se strmine pri promeni napona i struje povećati (na taj način će se smanjiti gubici pri komutaciji).

Praktična realizacija vučnog čopera sa IGBT prikazana je na slici:



Slika br.12.5.3. Principijelna električna šema vučnog čopera sa IGBT tranzistorima

Armaturna struja se meri iz razloga zaštite i regulacije vučne sile.

Ako se stave brži tranzistori, površine gubitaka (energija je jednaka površini ispod krive $P_{\gamma}=f(t)$) se smanjuju i tada se strmina pri promeni napona povećava. Veća strmina napona uzrokuje ubrzano starenje izolacije i povećanje elektromagnetnog šuma.

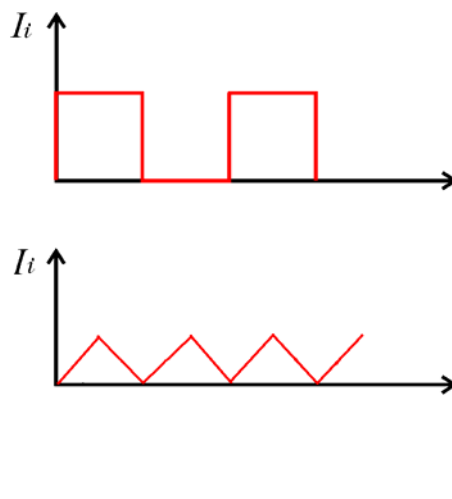
Vek motora određen je starenjem izolacije. Ako uzmemo da je debljina izolacije δ jačina električnog polja u izolaciji u stacionarnom stanju je:

$$E = \frac{U_{AB}}{\delta} \quad (11.5.3)$$

gde je U_{AB} napon na motoru.

Električno polje je ravnomerno samo u stacionarnom stanju. U prelaznim procesima jačina električnog polja raste, jer napon sa velikom strminom mora da se posmatra kao elektromagnetni talas koji prodire u materijal. Vreme usponske ivice je reda nanosekunde (elektromagnetni talas frekvencije reda GHz). U prvom trenutku je jačina električnog polja za red veličine veća od vrednosti u stacionarnom stanju. Dolazi do lokalnog proboja izolacije. Lokalnim sagorevanjem u izolaciji se stvaraju mikrooštećenja u vidu oksida (mehurići). Ako se ovo stalno ponavlja oksid se nagomilava i postepeno izolator dobija strukturu sundera. Sve ovo ubrzava starenje izolacije pa je vek motora oko 1 do 2 godine. Zbog toga se na red sa motorom stavlja jedna velika motorna prigušnica. Ona nije potrebna samo za smanjenje valovitosti struje motora (amplituda "ripla" struje motora je obrnuto srazmerna induktivnosti) nego i za sprečavanje prodora naponskog talasa velike strmine. Motorna prigušnica se vrlo često stavlja na oba kraja motora.

Povećanje elektromagnetnog šuma je druga loša posledica velike strmine napona. Kada je komutacija beskonačno brza, impulsi su četvrtasti. Ako je komutacija jako spora, impulsi su blažeg oblika.



Slika br.12.5.4. Vremenski oblici struje pri brznoj i sporij komutaciji

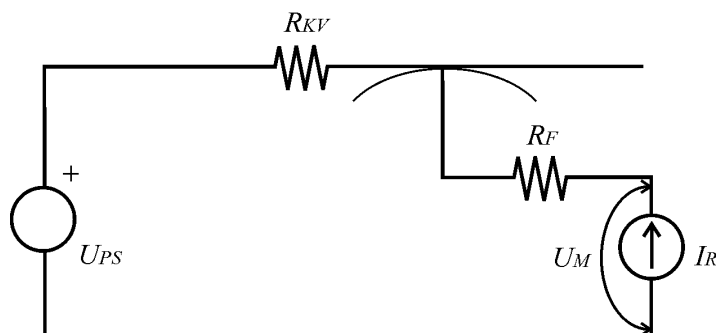
Realna komutacija je između ova dva ekstrema. Ako se u ova dva slučaja izvrši razvoj u Furijeov red, u prvom slučaju imamo neparne harmonike čija amplituda opada sa $1/(2n+1)$, a u drugom amplituda opada sa $1/(2n+1)^2$. Energija u spektru u zoni visokih učestanosti je daleko veća pri brznoj komutaciji nego pri sporijoj ([značajnije prisustvo viših harmonika](#)). Ako je, dakle, veća učestanost komutacije, javljaju se smetnje u komunikacionim vodovima kojim je uspostavljena veza sa vozom.

Oblik struje koju čoper uzima iz kontaktnog voda je impulsnog karaktera. Struja u kontaktnom vodu postoji samo kad tranzistor provodi. Oko kontaktnog voda ("treće šine" kod metroa) stvara se elektromagnetno polje, koje je promenljivo ([kontaktni vod postaje vrlo snažna antena, koja se često može nalaziti i u centru grada, izaziva velike elektro magnetske smetnje](#)). Intenzitet polja kod voda opada sa rastojanjem, dok kod tačkastog izvora opada sa kvadratom rastojanja. Kod nas je prisutan slučaj voda. Često se komunikacioni kablovi vode duž pruge i usled indukovanja napona u njima nastaje šum koji smeta.

Ulazni LC filter (elementi L_f i C_f na slici) se upravo i koristi da bi se eliminisao uticaj signala visokih frekvencija, tj. da bi se eliminisale veoma štetne smetnje koje ometaju komunikaciju sa vozom.

Pobuda motora je pri ovakvoj konfiguraciji obično nezavisna i napaja se iz posebnog izvora ([i taj izvor je najčešće regulisan jer postoji potreba da se radi i u režimu](#)

slabljenja polja). Ovakvom konfiguracijom može da se obavi i električno kočenje. Zamenska šema, računajući i podstanicu, pri električnom kočenju izgleda kao na slici:



Slika br.12.5.5. Zamenska šema pri električnom kočenju

Iz prethodnih razmatranja poznato je kako se ovde vrši električno kočenje. Na slici razlikujemo sledeće oznake:

U_{PS} - napon podstanice

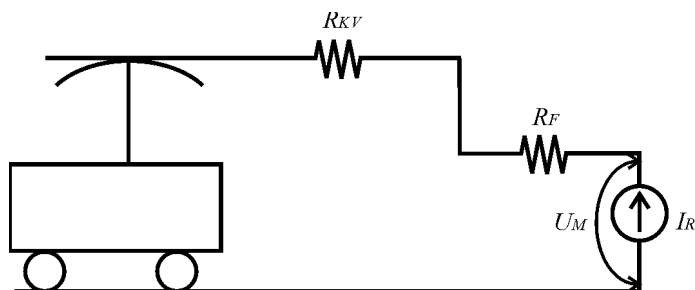
R_{KV} - otpor kontaktnog voda

R_F - otpor prigušnice iz filtra

Veza među njima je:

$$U_M = U_{PS} + (\Sigma R) I_R \quad (11.5.4)$$

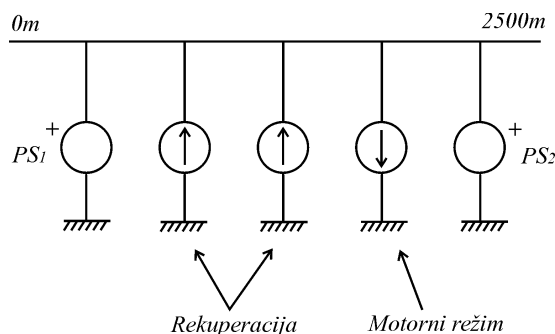
Podstanice su često takve da ne mogu da prihvate energiju koju daju vozila pri kočenju, pa se ta energija troši na neka druga kola, koja se u tom trenutku nalaze u motornom režimu rada. Taj proces prikazan je na slici:



Slika br.12.5.6. Ilustracija nereceptivnosti podstanica. Da bi rekuperacija bila moguća potrebno je da na kontakti vod bude priključen potrošač.

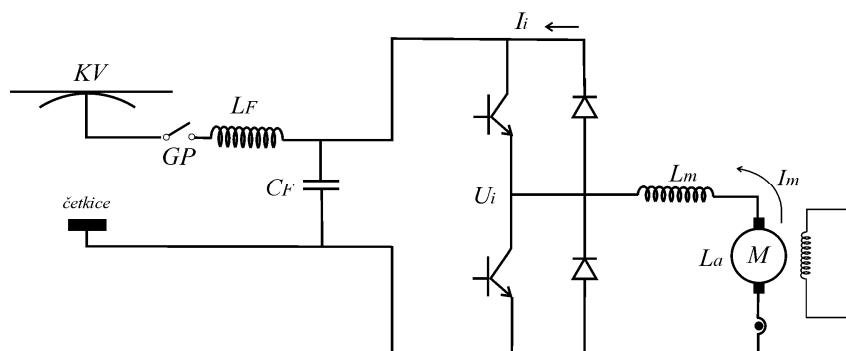
Od značaja je jedna veličina koja definiše statističko očekivanje kontaktne mreže da prihvati rekuperiranu energiju i naziva se receptivnost. To je sposobnost mreže da prihvati tu energiju.

Na primeru metroa, kod koga su podstanice na oko 2500m jedna od druge, posmatramo primer rekuperativnog kočenja i trošenja te energije kočenja od strane vozila u motornom režimu:



Slika br.12.5.7. Primer rekuperativnog kočenja metroa

Pri rekuperativnom kočenju šema veze i tokovi struja su kao na slici:

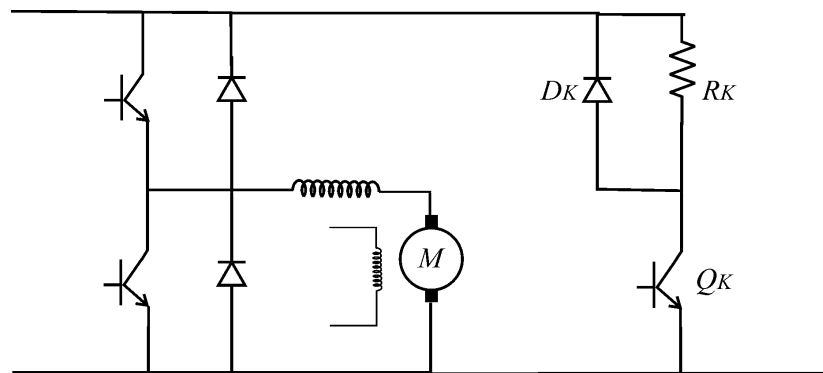


Slika br.12.5.8.(a) Principijelna električna šema pri rekuperativnom kočenju

Ukoliko mreža nije u stanju da prihvati rekuperiranu energiju događa se da struja rekuperacije preko diode $D2$ uvećava napon na C_F . Promena tog napona izražava se na sledeći način:

$$\frac{dU_{C_F}}{dt} = \frac{I_R}{C_F} \quad (11.5.5)$$

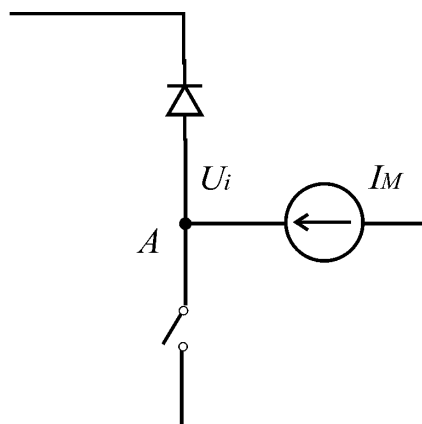
Za već desetak milisekundi ovaj napon može biti dovoljno veliki da trajno ošteti tranzistore vučnog čopera. Zbog toga se dodaje uređaj za kočenje, koji se sastoji od tranzistora, diode i otpornika:



Slika br.12.5.8.(b) Prisustvo otpornika za kočenje je obavezno zbog slučajeva nereceptivnosti mreže. Oni se implementiraju na prikazan način

Prema potrebi tranzistor T_K se uključuje i nagomilanu energiju iz C_F pretvara u toplotu na otporniku R_K . Ovako je moguće obaviti i dinamičko kočenje ali se to u praksi ne vrši, već se ceo uređaj dimenzioniše za slučaj velikih prenapona.

O elektromagnetnim smetnjama vučnog čopera je već bilo reči. Sada će se to dopuniti. Posmatrajmo slučaj kada su u funkciji tranzistor i dioda i to pri kočenju. Do trenutka t_I nije vodio tranzistor označen sa T_2 . Tada se on može posmatrati kao otvoren prekidač i na njemu postoji napon jednak E . Uključenjem tranzistora, što je ekvivalentno zatvaranju prekidača, a dok dioda još uvek nije prestala da provodi, može da dođe do debalansa struje u tački A na šemi:

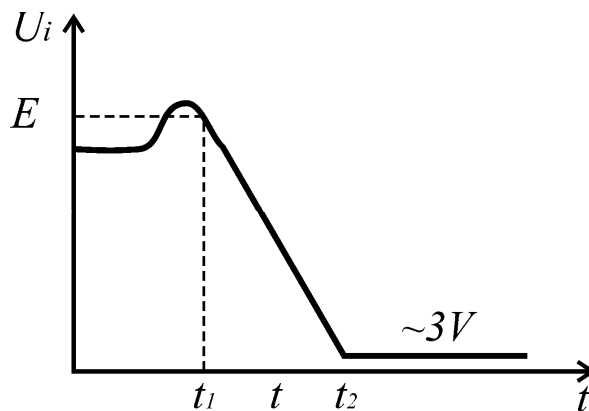


Slika br.12.5.9. Principijelna električna šema čopera u režimu kočenja dok vodi dioda

Da bi se zaključilo šta se događa posmatračemo parazitne kapacitivnosti (C_p) vodova prema masi i to sve kapacitivnosti svih provodnika vezanih za tačku A, prema masi. Promena napona u tački A, kojim je definisana njegova strmina, data je izrazom:

$$\frac{dU_A}{dt} = \frac{I_M}{C_p} \approx 20 \frac{V}{ns} \quad (11.5.6)$$

Na slici je dat realan izgled strmine napona:



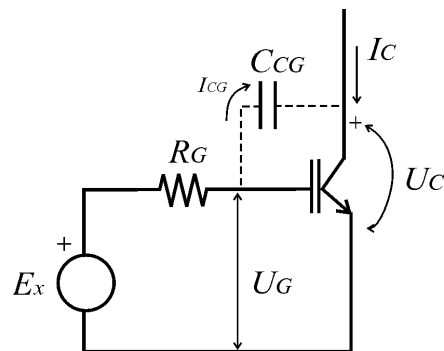
Slika br.12.5.10. Vremenski oblik strmine napona

Oscilacije koje se zapažaju na početku strmine nastaju zbog parazitnih LC kola.

U trenutku t_2 provede [tranzistor](#). Kritično vreme je od trenutka t_1 do t_2 . Za to vreme napon opada sa velikom strminom.

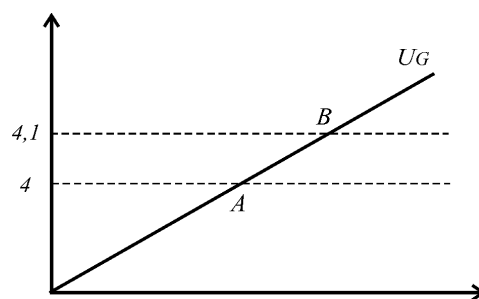
Ako je signal napona sa velikom strminom, spektar tog signala je bogatiji energijom u oblasti viših učestanosti. O tome je bilo reči. Javlja se problem elektromagnetne kompatibilnosti. U organizaciji transporta postoji sistem radio veza pa viši harmonici ovog signala napona mogu da izazovu problem. Elektromagnetne smetnje se redukuju specifičnim dizajnom vodova za upravljanje stanjem prekidača.

Naš prekidač, odnosno tranzistor prikazan je na sledećoj šemi, gde je ucrtana parazitna kapacitivnost C_{CG} između kolektora i gejta:



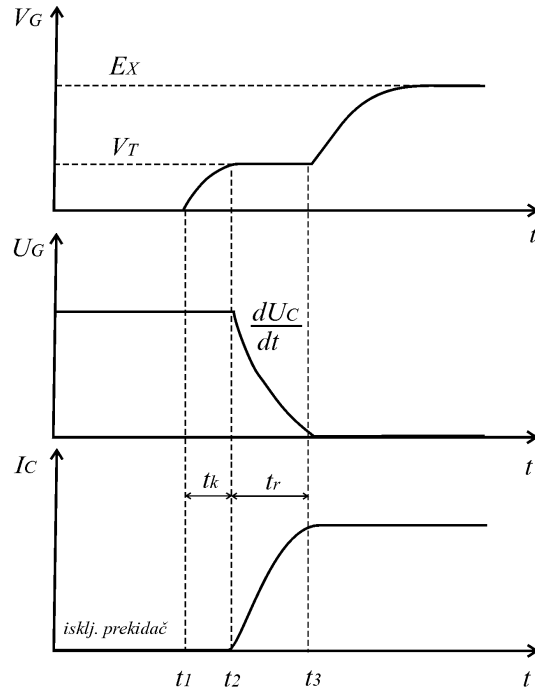
Slika br.12.5.11. Parazitivni kapaciteti tranzistora se ne smeju zaboraviti

Napon praga provođenja V_T je obično oko 4 do 7V. Taj napon je rastao od nule do, uzmimo, 4V, kada počinje da provodi tranzistor, odnosno da se ekvivalentni prekidač uključuje. Za vreme daljeg porasta ovog napona od oko 100mV, prekidač se uključuje tako da je u tački B na grafiku već potpuno uključen:



Slika br.12.5.12.

Posmatrajmo vremenske oblike napona na gejtu i kolektoru i struje kolektora:



Slika br.12.5.13. Vremenski oblici napona na gejtu i kolektoru i struje kolektora

Napon na gejtu uspostavlja vrednost od nule do napona praga za vreme od t_1 , kada počinje uključenje prekidača, do t_2 , kad je prekidač već potpuno uključen. Sve do trenutka t_2 struja kolektora je jednaka nuli i tek u tom trenutku počinje proces njenog uspostavljanja. Napon na kolektoru počinje u trenutku t_2 da opada i to opadanje traje do t_3 , kada ujedno u struja kolektora uspostavlja stalnu vrednost. Dalje, napon na gejtu polako dostiže vrednost E_X . Vremenski interval kašnjenja pri uspostavljanju provođenja prekidača izražava se kao:

$$t_k = t_2 - t_1 \quad (11.5.7)$$

Vreme uspona kolektorske struje je:

$$t_r = t_3 - t_2 \quad (11.5.8)$$

Dok U_C opada, kroz C_{CG} protiče struja:

$$I_{CG} = C_{CG} \frac{dU_C}{dt} \quad (11.5.9)$$

Balans struja u gejtju biće zadovoljen od t_2 do t_3 jer struja I_{R_G} teče kroz C_{CG} , odnosno $I_{R_G} = I_{C_{CG}}$. Izraz za struju kroz otpornik R_G je:

$$I_{R_G} = \frac{E_X - V_T}{R_G} = I_{C_{CG}} \quad (11.5.10)$$

Iz prethodna dva izraza može da se izvede izraz za promenu kolektorskog napona:

$$\frac{dU_C}{dt} = \frac{E_X - V_T}{R_G C_{CG}} \quad (11.5.11)$$

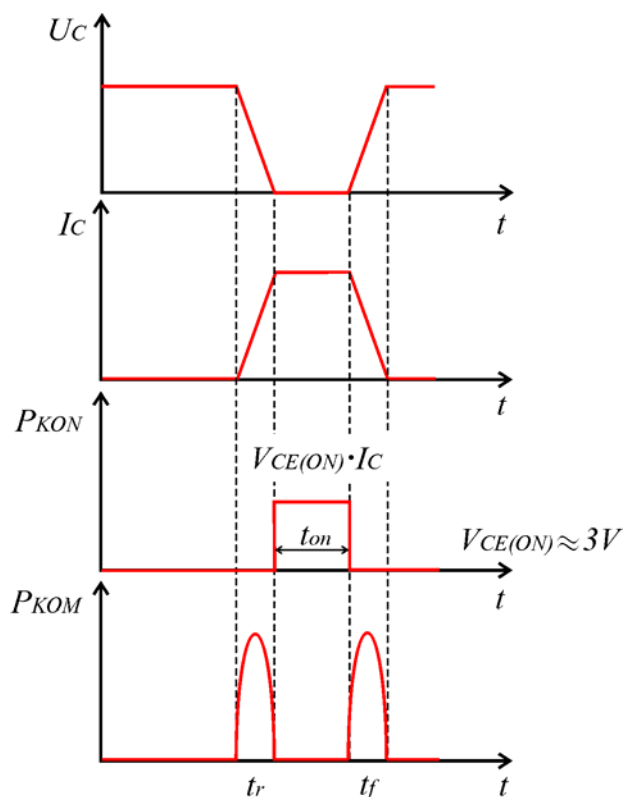
Zaključak je da na strminu napona može da se utiče izborom otpornika R_G , jer je za veću vrednost toga otpora manja strmina, a samim tim i manje smetnje. Ustvari, potreban je kompromis, jer treba uzeti u obzir i povećanje snage gubitaka pri smanjenju strmine. Gubici snage u toku komutacije imaju pik u toku intervala t_r . Ako je taj vremenski interval veći, tj. ako je strmina manja, veći su komutacioni gubici. Zbog toga R_G ne sme imati preterano veliku vrednost. Optimum se nalazi u odnosu na karakteristike čopera. Ako je čoper brži, ugrađuju se dodatni filtri, koji će smanjivati smetnje. Ako je sporiji, gubici snage su veći pa je potreban rashladni sistem. Pored gubitaka snage usled komutacije postoje i kondukcionni gubici snage. Vrednost ovih gubitaka srazmerna je proizvodu napona između kolektora i emitera tranzistora i struje kolektora, i sve to za slučaj kada tranzistor provodi, što je ekvivalentno zatvorenom prekidaču:

$$P_\gamma^{kon} = \frac{t_{on}}{T} U_{CE} I_C \quad (11.5.12)$$

Ukupni gubici snage jednaki su zbiru kondukcionnih i komutacionih gubitaka snage:

$$P_\gamma = P_\gamma^{kon} + P_\gamma^{kom} \quad (11.5.13)$$

Na sledećim dijagramima, usvajajući prethodna razmatranja, jasno se vidi vremenska zavisnost i trenuci postojanja pojedinih gubitaka:



Slika br.12.5.14. Vremenska zavisnost pojedinih gubitaka (vođenja i komutacije)

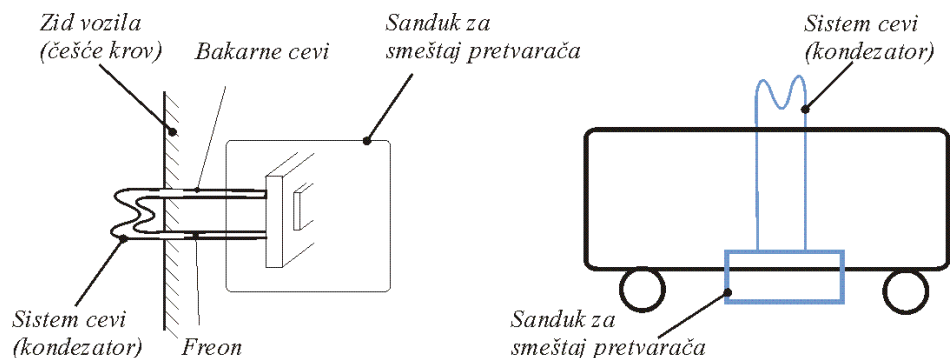
Ako se usvoji da su vremena uspona i pada struje i napona jednaka i da je promena talasa napona i struje linearna, za srednju vrednost komutacionih gubitaka se dobija:

$$W_{\gamma}^{kom} = \frac{1}{2} U_C^{\max} I_C f_{kom} \quad (11.5.14)$$

Dimenzije prekidača su $100 \times 50 \times 25 \text{ mm}$ (za stotinak volti i 1500 A). Gubici su oko 1500 W . Problem koji se javlja je kako odvesti toplotu da ne bi došlo do oštećenja. Mali prekidači imaju mali toplotni kapacitet pa se stoga montiraju na aluminijumski hladnjak. Hlađenje ventilatorom nije moguće vršiti jer u električnoj vuči ceo pretvarač mora biti izolovan. Sanduk za smeštaj pretvarača je potpuno zatvoren. U njemu su visoki napon i velike struje pa je veliko i elektromagnetno zračenje.

Za hlađenje se koriste toplotni ili freonske pumpe. Kao rashladno sredstvo koristi se freon (CFC). Njegova osobina je da ključa na oko 74°C . Kad preko sistema cevi dođe do hladnjaka on se zagreva i proključa, pa se vodi do kondenzatora gde se kondenzuje

i oslobađa primljenu toplotu. Na taj način se prekidač hladi. Sa dva do tri litra freona i 15m bakarnih cevi odvede se oko 3kW toplotne snage. Na sledećoj slici prikazan je ovaj sistem za hlađenje:



Slika br.12.5.15. Sistemom cevi se odvede gubitci sa prekidača u spoljnu sredinu

Freon ima negativnu osobinu što uništava ozon. Time ugrožava životnu sredinu. Njegova upotreba je zbog toga dozvoljena u isključivo zatvorenim i bezbednim sistemima.

12.6 Regulacioni blok dijagram tranzistorskog vučnog čopera sa IGBT

Ovaj regulacioni blok dijagram predstavlja šemu regulacije koja se u praktičnoj realizaciji pridružuje čoperu. Da bi se vršila regulacija vučne sile, potrebno je stalno imati uvid u određen broj veličina, na osnovu čega se pristupa regulaciji. To se sve obavlja automatskim putem.

Stalno se mere sledeće veličine:

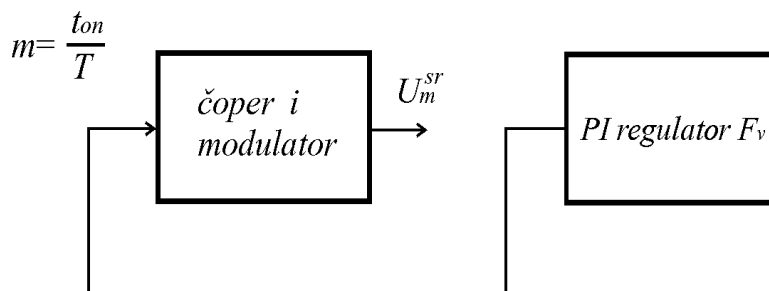
- aramturna struja I_a ,
- temperatura θ ,
- ulazni napon čopera U_{ul} .

Vrednost ugaone brzine ω_m obrtanja se procenjuje kroz obrazac:

$$\omega_m \approx \frac{U_M}{k_e \phi} \quad (11.6.1)$$

Nakon akviziranja svih ovih podataka, regulacija ima sve što je potrebno da bi izvršila svoj zadatak, a to je:

- određivanje t_{on} , od koga zavisi srednja vrednost napona na motoru
- određivanje napona napajanja pobudnog namotaja, od koga zavisi struja pobude i fluks pobude



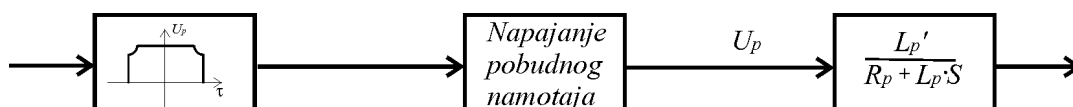
Slika br.12.6.1. Principijelna šema regulacije vučne sile

Napon napajanja motora je funkcija indeksa modulacije, tj. vremena t_{on}

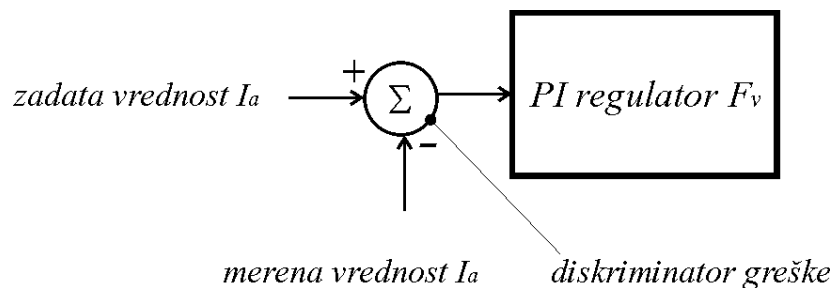
$$U_a \sim f(m) \sim f(t_{on}) \quad (11.6.2)$$

Armatura struja se dobija iz obrasca:

$$I_a = \frac{U_M - E_{MS}}{R_a + (L_M + L_a) \cdot s} \quad (11.6.3)$$



Slika br.12.6.2.



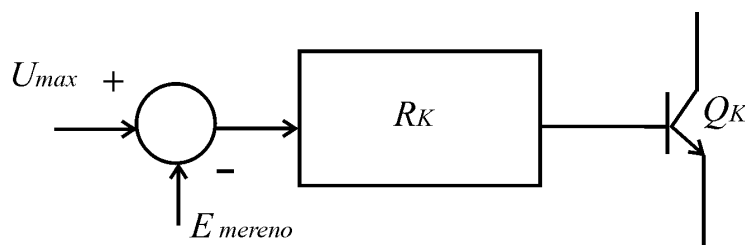
Slika br.12.6.3. Ulazna veličina PI regulatora jeste apsolutna greška ostvarene vrednosti struje u odnosu na merenu

Struja I_a^* , željena armaturna struja, određuje se na sledeći način:

- regulacijom brzine (čovek reguliše brzinu)
- diskriminator greške brzine (korekciju vrši čovek)
- zadavanje vučne sile (čovek je zadaje pomeranjem pedale gasa)

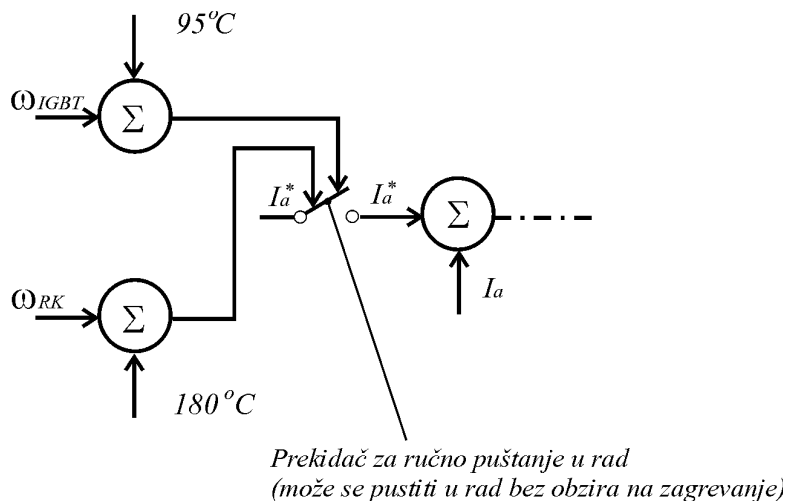
Veoma često položaj pedale direktno određuje I_a^* .

Ovaj regulator ima zadatak da se obezbedi i ograničenje napona kojim se čoper napaja.



Slika br.12.6.4. Regulator kočenja

Čoper je snabdeven i sistemom zaštite od pregrevanja (meri se temperatura poluprovodnika, prekidača i otpornika za kočenje, pa ako se premaše maksimalne vrednosti ukida se armaturna struja).

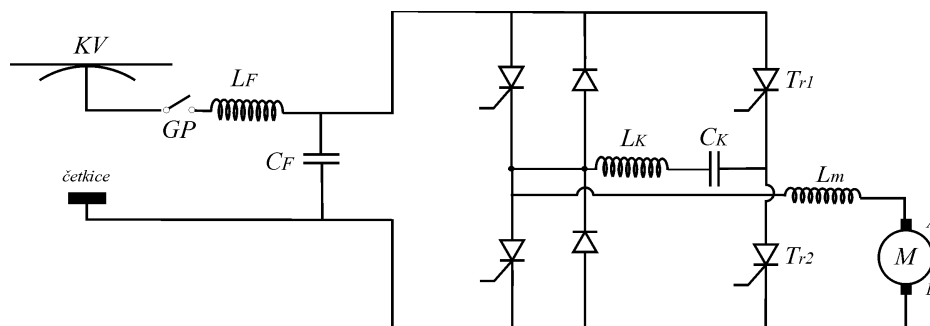


Slika br.12.6.5. Princip zaštite od pregrevanja

U slučaju potrebe postoji opcija da čoper radi bez obzira na pregrevanje (zaštita isključena).

12.7 Tiristorski vučni čoper

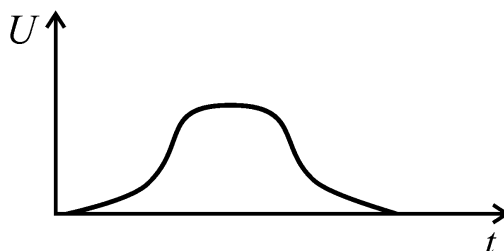
Tiristorski vučni čoperi imaju sličan princip rada kao i tranzistorski. Umesto tranzistora kao prekidača, ovde se koriste tiristori. Topologija kola je ista i data je na sledećoj slici:



Slika br.12.7.1. Principijelna električna šema tiristorskog vučnog čopera

Glavni elementi su tiristori T_1 i T_2 . Komutaciona kola isključuju tiristore s obzirom da oni to sami ne mogu da učine. Komutaciono kolo se sastoji od pomoćnih tiristora T_{r1} i T_{r2} , kondenzatora C_k i prigušnice L_k .

Kod tiristorskih čopera, zbog rezonantnih komutacija, napon na izlazu će imati blage ivice, odnosno neće imati oštre promene, kao što je prikazano na slici:



Slika br.12.7.2. Vremenski oblik napona tiristora

To se povoljno odražava na funkcionisanje motora. Izolacija motora se ne napreže.

Kod svakog tiristorskog čopera postoji minimalno vreme vođenja:

$$t_{on}^{\min} = k \cdot 2\pi \sqrt{L_K C_K} \quad (11.7.1)$$

gde k uzima vrednost:

$$k \in \left(\frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2} \right) \quad (11.7.2)$$

Ovo vreme postoji zbog sređivanja situacije u komutacionom kolu. Kada se kolo isključuje, moramo biti sigurni da će sledeću komutaciju kolo dočekati spremno. C_K mora svaku narednu komutaciju da dočeka na određenom potencijalu. U toku t_{on} mora da se završi cela komutacija.

Vreme između isključenja jednog i uključenja drugog tiristora ne sme biti manje od vremena relaksacije.

Pri polasku motor na sebi zahteva mali napon. Srednja vrednost napona ograničena je minimalnim vremenom vođenja tiristora $t_{on}^{\min}$:

$$U_{sr} = U_{kv} \frac{t_{on}}{T}; U_{sr}^{\min} = U_{kv} \frac{t_{on}^{\min}}{T} = (R_a + R_{Lm}) I_a \quad (11.7.3)$$

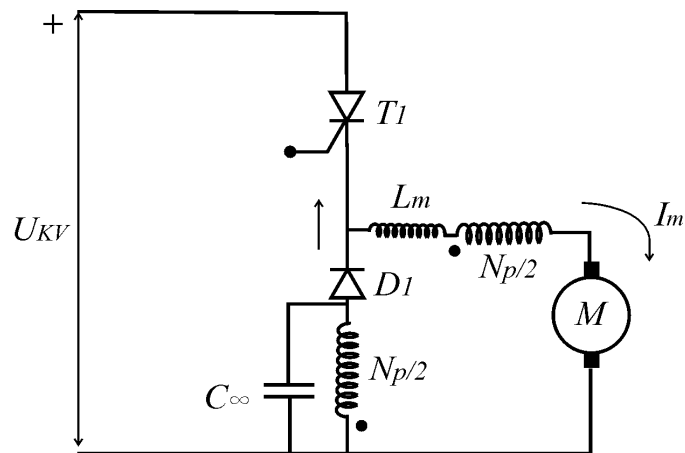
Često je ova vrednost $t_{on}^{\min}$ isuviše velika za polazak koji traži veoma male struje. Zbog toga se postavlja pitanje kako pokrenuti voz sa tiristorskim čoperom.

Da bi se snizila srednja vrednost napona, povećava se perioda T , tj. polazi se sa sniženom učestanošću. Pojavljuje se problem jer ta učestanost ulazi u opseg čujnosti (stvara se pištava buka). Osnovna mana tiristorskih čopera je što imaju malu komutacionu učestanost (reda 200 do 800Hz). Može se očekivati velika valovitost struje. Zbog toga se na red sa motorom ugrađuje motorna prigušnica.

12.8 Tiristorski nerekuperativni čoper sa tiristorima za automatsko slabljenje polja

Primena tranzistorskih i tiristorskih čopera za napajanje armaturnog namota izaziva valovitost napona. Kod vučnih pogona manjih snaga upotrebljavaju se čoperi sa automatskim slabljenjem polja, gde se indeksom modulacije utiče na pobudnu struju. Ovi čoperi mogu biti sa tranzistorima ili sa tiristorima.

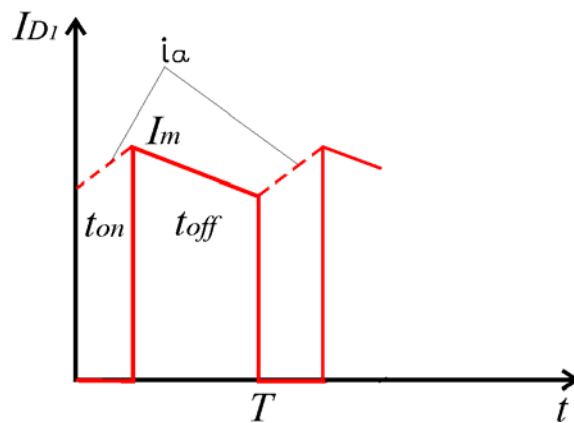
Na slici je prikazan tiristorski čoper sa automatskim slabljenjem polja:



Slika br.12.8.1. Principijelna električna šema tiristorskog vučnog čopera sa automatskim slabljenjem polja

Motor ima pobudni namotaj iz dva jednaka dela sa po $N_p/2$ navojaka. Struja kroz diodu D_1 je impulsnog karaktera.

Vremenski oblici izlaznog napona i struje kroz diodu, uvažavajući vreme vođenja tiristora t_{on} , dati su na slici:



Slika br.12.8.2. Vremenski oblik struje diode i tiristora

Vidi se da dioda provodi onda kada je prekidač otvoren, odnosno kada je tiristor neprovođan. Struja motora je, za vreme vođenja tiristora, označena crticama, a dalje se poklapa sa strujom diode (to je jedna ista struja).

Postoji naizmenična komponenta struje kroz diodu. Ona teče kroz kondenzator velike kapacitivnosti i to je primenljivo za male snage. Sa porastom snage bila bi potrebna još veća kapacitivnost pa se tada može umesto kondenzatora koristiti i otpornik.

Srednja vrednost struje kroz diodu je:

$$I_{D1}^{sr} = (1-m)I_m \quad (11.8.1)$$

gde je I_m struje motora, a m indeks modulacije. To je struja koja teče kroz namotaj $N_p/2$, kao što je i označeno na prethodnoj slici.

Ukupna vrednost magnetopobudne sile pobudnog namotaja je:

$$F_p = \sum (Ni) = F_1 + F_2 = \frac{N_p}{2} I_m + \frac{N_p}{2} (1-m) I_m = N_p I_m \left(1 - \frac{m}{2}\right) \quad (11.8.2)$$

Za čoper važi:

$$m \sim U_{sr} \sim E \sim \omega \quad (11.8.3)$$

Imamo u vidu da je U_{sr} određeno sa m , i srazmerno sa E , a E sa ω , zaključuje se da je indeks modulacije vezan za brzinu. Kako brzina raste, tj. raste m , tada magnetopobudna sila opada i pobudni fluks opada jer je:

$$\phi_p = \frac{F_p}{R_\mu} \quad (11.8.4)$$

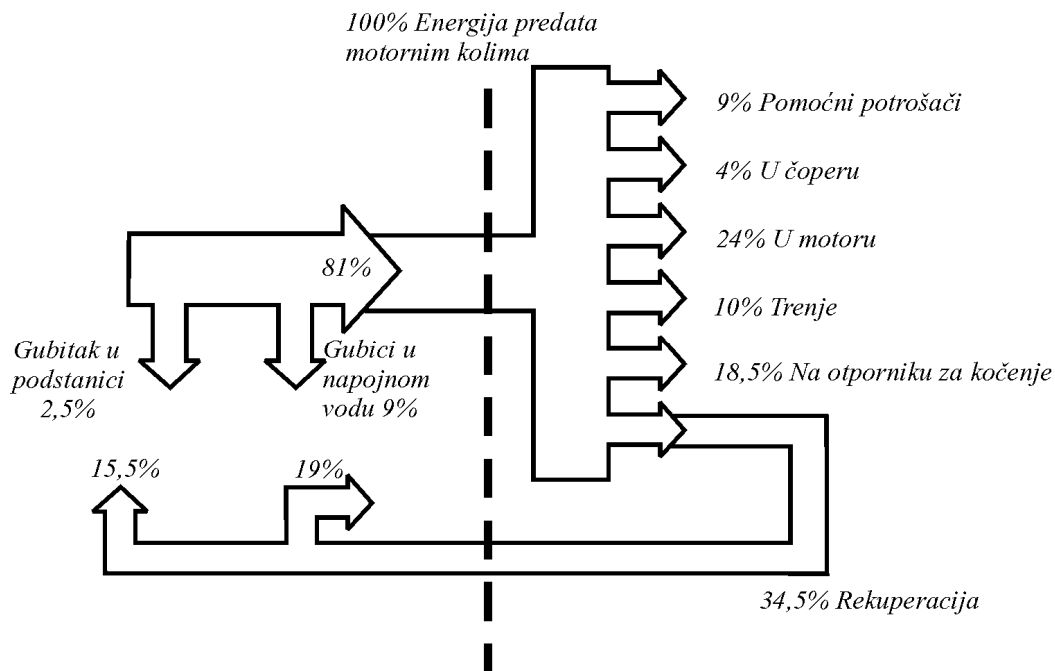
Ostvareno je automatsko slabljenje polja.

Maksimalni iznos slabljenja polja zavisi od podele pobudnog namotaja. Ovde je pobudni namotaj podeljen na dva jednaka dela. Maksimalni iznos slabljenja polja je za $m=1$ i iznosi 0,5. U slučaju drugačije podele pobudnog namotaja, maksimalni iznos slabljenja polja će biti drugačiji, ali vodi se računa o tome da usled slabljenja polja ne

dođe do razmagnetisavanja mašine i do punog izražaja reakcije indukta sa svim svojim posledicama.

12.9 Bilans utrošene električne energije

Bilans utrošene električne energije u Njujorku za kola sa ugrađenim čoperima, dat je na sledećoj slici. Strelicama su označeni tokovi električne energije. Označene su vrste i mesta potrošnje i dat je procentualni iznos utrošene električne energije.



Slika br.12.9.1. Tok snaga u metrou velikog grada

12.10 Vozila za brz prevoz putnika (RPTS-Rapid Passenger Transportation System)

To je sistem vozila.

Trolejbusi:

brzina: $v=55\text{km/h}$

razmak između stanica: $\Delta L=500\text{m}$

broj motora: (1)

snaga: $P=120\div160\text{kW}$

težina: $G=12\text{t}$

Tramvaji:

brzina: $v=40\div60\text{km/h}$

kontaktna mreža: $700\div800\text{V}$

broj motora: (4)

suma snage: $P_{\Sigma}=160\div300\text{kW}$

težina: $G=25\div35\text{t}$

Metro:

razmak između stanica: $\Delta L=2\text{km}$

napajanje: treća šina $1200\div1500\text{V}$

broj motora: (8)

suma snage: $P_{\Sigma}=800\text{kW}\div1\text{MW}$

težina: $G\approx70\text{t}$

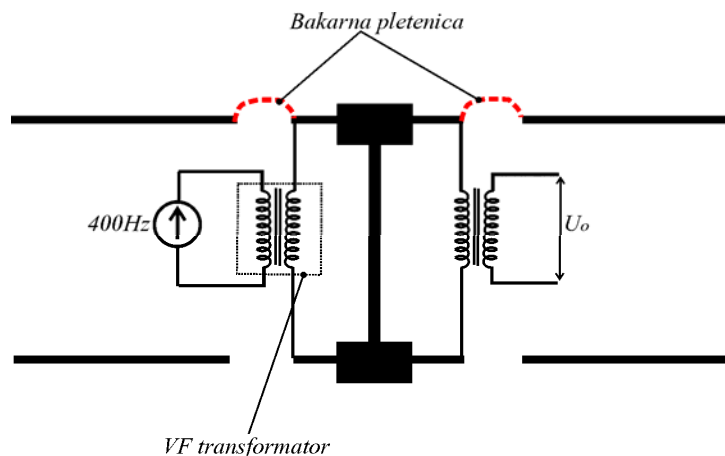
na čelu i začelju su motorna kola

12.10.a Pomoćna oprema vozila za masovni prevoz putnika

Pod pomoćnom opremom vozila za masovni prevoz putnika podrazumevaćemo:

- uređaje za signalizaciju i detekciju voza,
- uređaje za grejanje i klimatizaciju,
- “glavno” i “dežurno” svetlo.

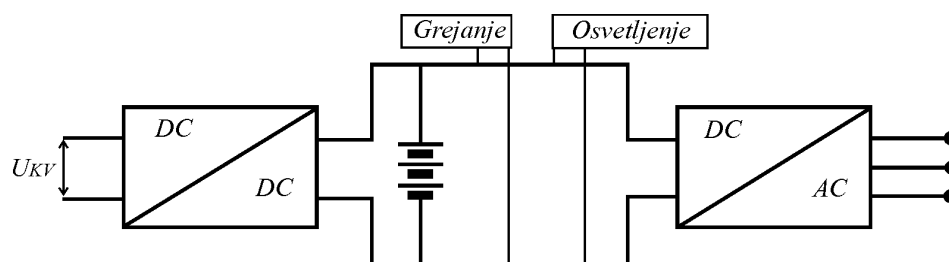
Uređaj za detekciju voza je lociran u šinama. Posmatramo sledeću sliku:



Slika br.12.10.1. Uređaj za detekciju voza

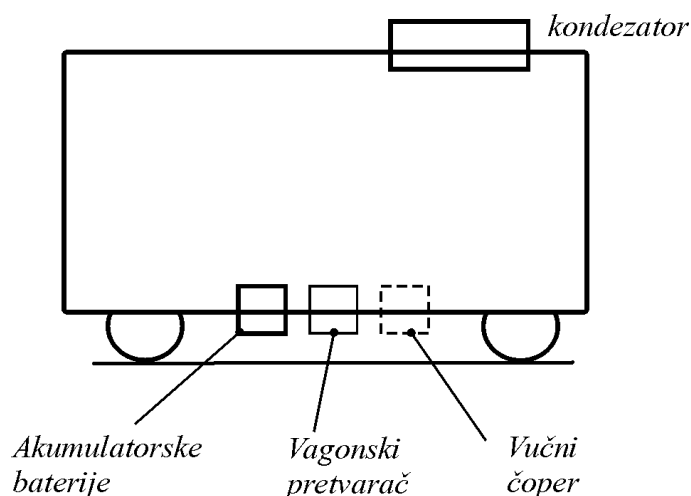
Jedna šina je sekcionisana. Prisutan je visokofrekvencijski transformator. Dve šine se dovode na napon učestanosti $83,3\text{Hz}$, 400Hz ili više (reda kHz). Frekvencija je ista za jednu podsekciju. Na drugoj strani podsekcije registruje se detekcioni signal U_0 . Ako je taj napon mali, šine su kratko spojene. Na tom delu trase nalazi se voz. Ako napon ima veliku vrednost, šine su rastavljene, odnosno voz nije prisutan. Pouzdanost zavisi od preciznosti određivanja amplitude napona. Ukoliko postoje smetnje od strane pretvarača, detekcija voza može da se poremeti. Pošto učestanosti od 50Hz nisu samerljive sa $83,3\text{Hz}$, primenjuje se ova druga učestanost u uređajima za detekciju voza jer se tako olakšava filtracija ulaznim LC filtrom. Time se eliminiše i štetan uticaj smetnji.

Ukupna električna snaga potrebna za osvetljenje jednog vagona je oko $2,2kW$. Za zagrevanje jednih kola koriste se grejači snage oko $50kW$. Električna šema napajanja sistema za osvetljenje i grejanje data je na slici:



Slika br.12.10.2. Principijelna šema podmirivanja ostalih energetskih potreba

Pored ovoga, u vozovima postoje uređaji za klimatizaciju i regulatori vlažnosti vazduha. U svakim kolima mora da postoji vagonski pretvarač i akumulatorska baterija. Njihov položaj je kao na slici:

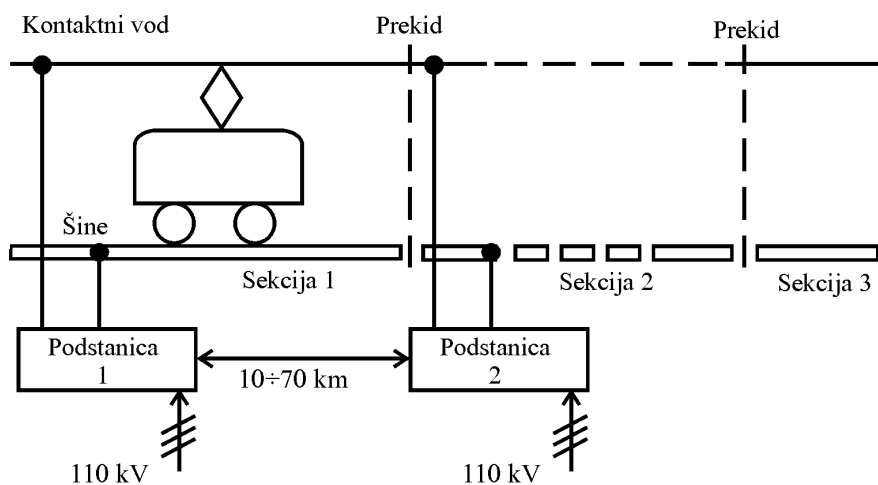


Slika br.12.10.3. Položaj elemenata energetike u lokomotivi

13 Jednofazne lokomotive

Naponi u električnoj vuči koji se javljaju na kontaktnim mrežama u Evropi su: jednosmerni $1,5kV$ i $3kV$; naizmjenični $15kV/16^2/3Hz$ i $25kV/50Hz$ koji je i najrasprostranjeniji sistem napajanja lokomotiva.

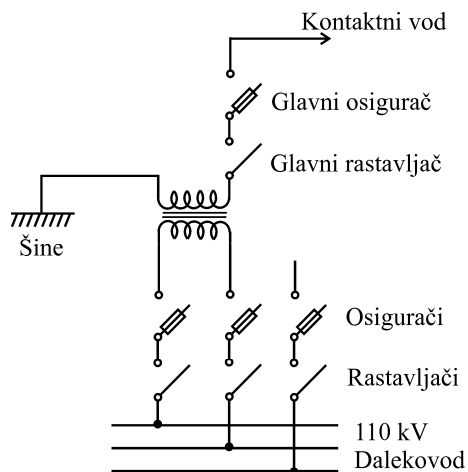
Sistem se sastoji iz kontaktnog voda i stabilnih postrojenja tzv. podstanica:



Slika br.13.1. Povezivanje podstanica

Svaka podstanica napaja jednu sekciju. Sekcije su električno izolovane zato što se podstanice napajaju sa naponom $110kV$ pa na ovolikim rastojanjima mogu imati različit fazni stav. Podstanica je jedan transformator koji na svom primaru ima $110kV$ a na sekundaru se vezuje za vod i šine kao na prethodnoj slici.

Izgled postanice bez relejne zaštite:

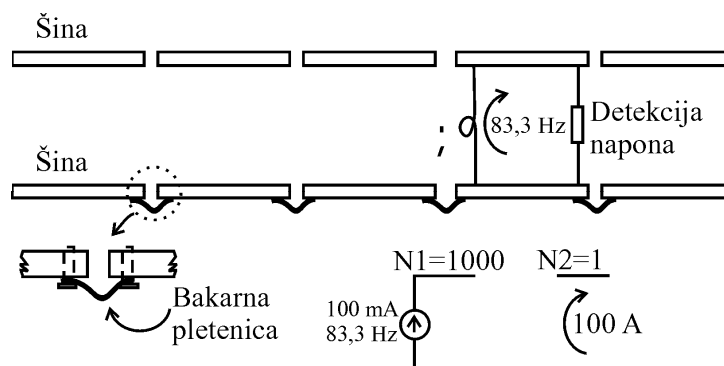


Slika br.13.2. Izgled postanice bez relejne zaštite

U podstanici se može imati:

- jedan transformator $10,5 \text{ MVA}$
- dva transformatora $2 \times 7,5 \text{ MVA}$

Povezivanje za kontaktni vod se vrši preko užeta, a sa šinama preko bakarne pletenice. Za napajanje lokomotive koristi se samo jedna šina, a druga je razdvojena na delove koji su električno izolovane jedno od drugog zato što se javlja potreba da se detektuje lokacija voza.



Slika br.13.3. Povezivanje samo jedne šine (koristi se kao poratni vod)

Kao sto je poznato injektuje se struja $83,3 \text{ Hz}$, a na kraju se detektuje (postoji filter). Ako se na deonici nalazi voz, kolo se zatvara kroz točkove voza.

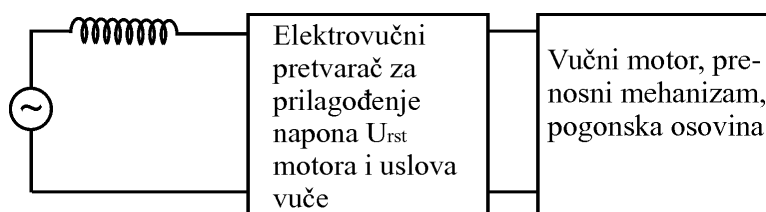
Prividna snaga lokomotive je:

$$\begin{aligned}
 S_l &\sim 4MVA \\
 \cos\varphi &\sim 0,5-0,8 \\
 x_{kv} &\sim 0,38 \frac{\Omega}{km}
 \end{aligned}
 \tag{12.0.1}$$

Uzimajući u obzir navedene podatke, napon kontaktnog voda može da varira u sledećim granicama:

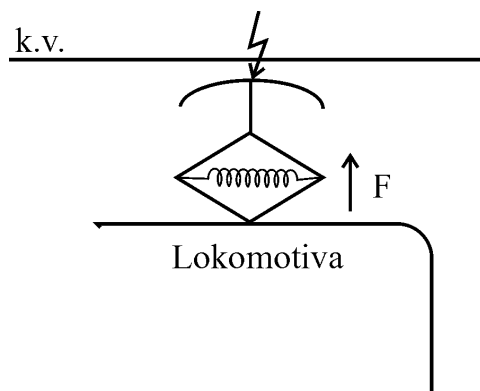
$$U_{kv} \in [18,30]kV \tag{12.0.2}$$

Zamenska šema kontaktnog voda priključenog na sistem izgleda kao na slici:



Slika br.13.4. Elektromehanički sistem vučnih pogona

Treba voditi računa o varijacijama ovog napona (U_{kv}), i o prenaponima pri uključenju i isključenju pantografa. Javljaju se prenaponi trajanja $\tau \sim 5-50\mu s$ i mogu da dostignu vrednost i do $60kV$.



Slika br.13.5. Kontakt sa kontaktnim vodom se ostvaruje pantografom

Lokomotiva u teretnoj železnici može imati vučeni teret $G_v \sim 1000t$, može se kretati brzinom $v \sim 30m/s$. Zbir stalnih otpora kretanju je

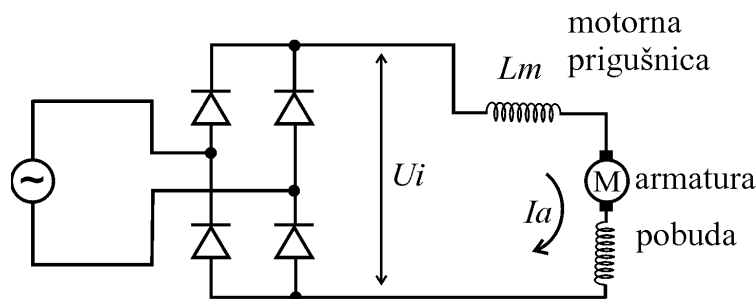
$$\sum f_{ot} \left[\frac{kp}{t} \right] = 2 + kv^2 (\approx 5 \frac{kp}{t}) \quad (12.0.3)$$

što se može iskoristiti za određivanje ukupne vučne sile. Ovo važi za kretanje po ravnoj pruzi. Ako se kreće po maksimalnom usponu od 30‰ od lokomotive bi se tražila snaga od oko 10MW. Pošto je tipično nominalno $P_{nom} = 4MW$ po lokomotivi, treba priključiti dve lokomotive. Između napajanja i zahteva koje mora da ostvari lokomotiva, mora da postoje energetska pretvarač i vučni motor.

13.1 Vučni motori koji se koriste u lokomotivi

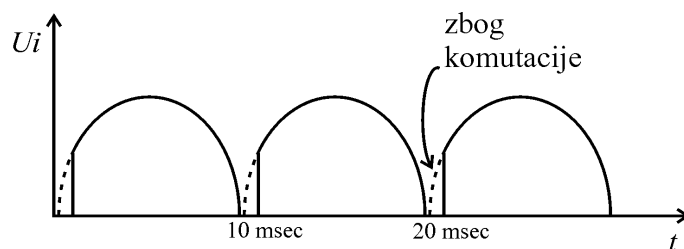
Redni motor jednosmerne struje načinjen je za rad sa valovitom strujom. Još uvek se najčešće koristi, veoma je pouzdan, obezbeđena je proizvodnja i remont (u industriji).

Šema napajanja vučnog motora za valovitu struju data je na slici:



Slika br.13.1.1. Principijelna električna šema napajanja motora JS

Zavisnost izlaznog napona U_i (napon na izlazu diodnog ispravljača) od vremena:

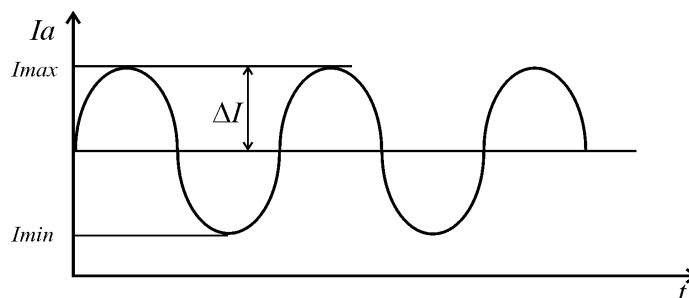


Slika br.13.1.2. Vremenska zavisnost napona dovedenog motoru

Oblik ovog napona nije prostoperiodičan. On će imati i više harmonike. Srednja vrednost napona U_i iznosi :

$$U_i^{sr} = \frac{2}{\pi} U_m \quad (12.1.1)$$

Dominantna komponenta ima učestanost od 100Hz i proporcionalna je mrežnom naponu ($U_{100}=kU_m$). Ova komponenta smeta. Dominantna naizmjenična komponenta struje je 100Hz :



Slika br.13.1.3. Vremenski oblik struje motora. Postoji ripl struje.

Promena struje ΔI :

$$\Delta I = \frac{U_{100}}{Z_{100}} \quad (12.1.2)$$

Impedansa motora na 100Hz :

$$Z_{100} = 2\pi \cdot 100 \Sigma L \quad (12.1.3)$$

Talasnost struje je:

$$\mu = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{\Delta I}{I_{sr}} \quad (12.1.4)$$

i kreće se od 5 do 20%.

Valovitost se ne može potpuno ukloniti ali se može ublažiti rednom prigušnicom čime se povećava Z_{100} i utiče na dinamiku upravljanja motora jer usporava odziv struje. Povećanje talasnosti od 10% prouzrokuje povećanje efektivne vrednosti struje za oko 1%. To znači da talasnost struje malo povećava njenu efektivnu vrednost.

U slučaju rednog motora kod koga je armaturna struja jednaka pobudnoj struji imamo naizmeničnu komponentu i u armaturi i u pobudi. Sledi da pobudni fluks takođe ima naizmeničnu komponentu što je štetno jer figuriše u izrazima za momenat i elektromotornu silu. Javljaju se pulsacije momenta i *ems* što nije dobro. Remeti se ravnoteža napona zbog pulsacije *ems*, pa se javljaju kružne struje. Javljaju se vibracije usled pulsacije momenta. Kod rednog motora momenat je proporcionalan kvadratu armaturne struje, pa je koeficijent valovitosti momenta veći, ali ovo ne smeta jer je u odnosu na inercije obrtnih masa motora i mehaničkih delova ovo ima mali uticaj.

$$\omega_{\sim}^R(s) \cong \frac{1}{J_s} M_{\sim}^{em}(s) \quad (12.1.5)$$

Drugim rečima masa motora se ponaša kao niskopropusni filter, odnosno pulsacije momenta su dovoljno velike učestanosti da masa motora (zbog inercije) ne stigne da odreaguje kretanjem (nema odziva).

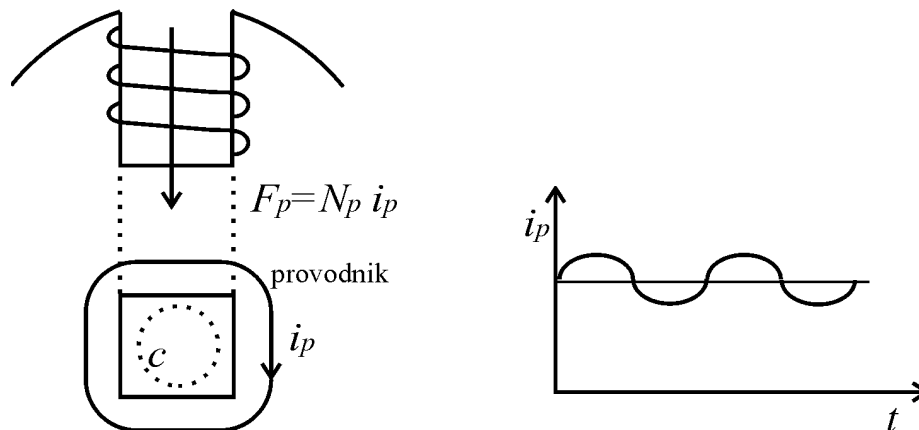
Ova valovitost nam smeta zbog zagrevanja, gubitaka u gvožđu i komutacije.

$$I_{RMS}^a = I_{sr}^a \sqrt{1 + \frac{\mu^2}{3}} \quad (12.1.6)$$

Iz prethodnog izraza se vidi da neće biti velikog uticaja na povećano zagrevanje.

Stator rednog motora načinjen je od livenog gvožđa (nije laminiran jer protiču jednosmerne struje pa nema vihornih struja). Ovde međutim fluks poseduje naizmeničnu komponentu.

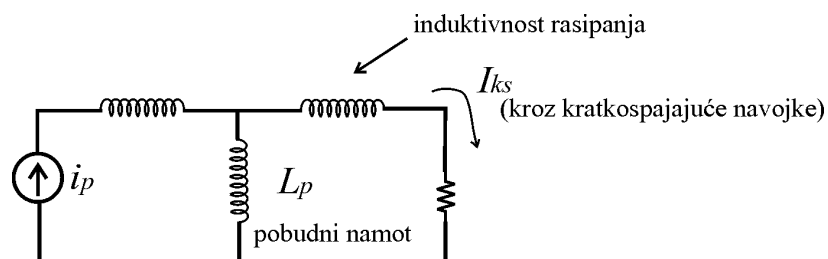
Na slici je prikazan pobudni namotaj sa smerom mps i grafik valovitosti pobudne struje:



Slika br.13.1.4. Pobudni namotaj sa smerom mps i grafik valovitosti pobudne struje

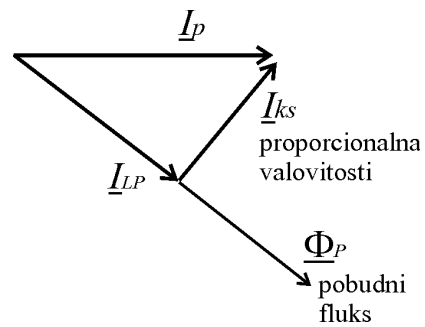
Može se uočiti kontura C gde se javljaju vihorne struje. Ovo podseća na transformator gde je primar namot pobude.

Električna šema kola pobude:



Slika br.13.1.5. Principijelna električna šema pobude

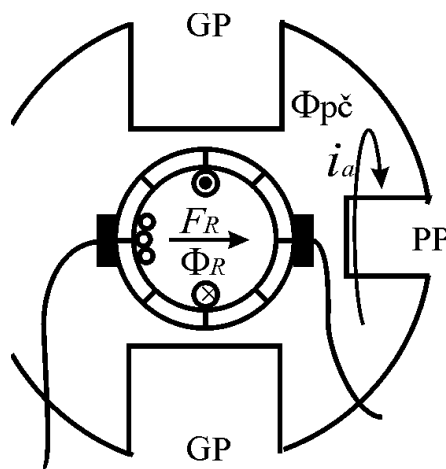
Struja I_p ima dve komponente prikazane na vektorskom dijagramu.



Slika br.13.1.6. Vektorski dijagram komponenti pobudne struje

Ovde još naizmenična komponenta fluksa kasni u odnosu na naizmeničnu komponentu pobudne struje što prouzrokuje probleme kod komutacije. Sam pulsacioni karakter pobudnog fluksa ne prouzrokuje probleme.

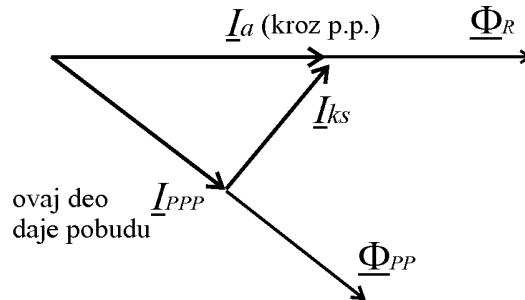
Na narednoj slici, koja prikazuje unutrašnjost motora, vidi se kako se kroz pomoćne polove propušta I_a u takvom smeru da se kompenzuje reakcija indukta.



Slika br.13.1.7. Reakcija indukta se kompenzuje pomoćnim polovima

Pomoćni polovi prave se od limova koji su dva do tri puta tanji nego za jaram i za glavne polove. Osnovni zadatak pomoćnih polova je da linearizuju komutaciju ($B_{PP} \sim I_a$). Znači da ako I_a ima u sebi naizmeničnu komponentu to će i B_{PP} da osciluje.

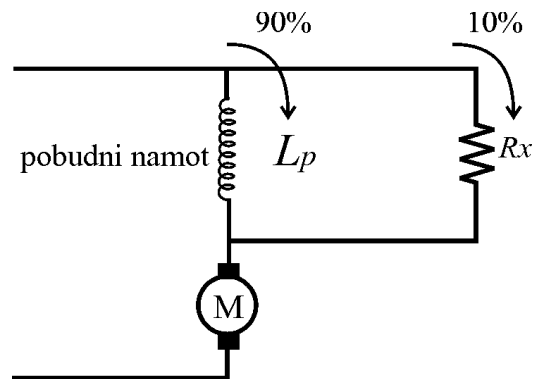
Rotor ovih mašina je laminiran. Fluksevi Φ_r i Φ_{pp} nisu kolinearni pa se javlja fluks u zoni komutacije, što ugrožava komutaciju.



Slika br.13.1.8. Reakcija indukta ugrožava komutaciju

Zato se stator pravi laminiran (ovo je jedno od rešenja) ili liveni stator sa L_m (uvećana vrednost motorne prigušnice), što povećava Z_{100} a ovo smanjuje talasnost (tada valovitost mora da se smanji ispod 10%).

Kod prvog rešenja često se pobuda šantira sa jednim stalno priključenim otpornikom (nije mu uloga u slabljenju polja):



Slika br.13.1.9.

$$\begin{aligned} R_x &\sim 10R_p \\ R_x &\ll 2\pi 100L_p \end{aligned} \quad (12.1.7)$$

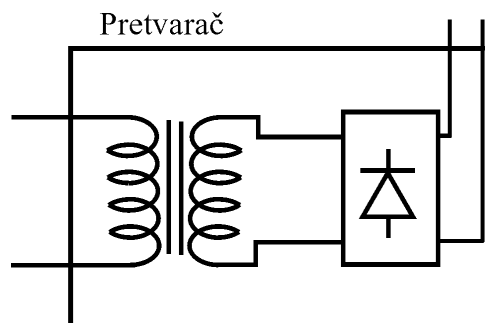
Svrha otpornika šanta je da na sebe preuzme naizmeničnu komponentu struje, koja bi, u suprotnom, stvarala naizmenični fluks zbog koga se javljaju pulsacije momenta, što uzrokuje veće gubike, odnosno veće zagrevanje.

Tipične veličine za ove motore:

- $U_n \sim 1000 \div 1500 \text{ V}$
- $I_n \sim 500 \div 1000 \text{ A}$
- $n_n \sim 1000 \div 1500 \text{ ob/min}$

Kod mašina jednosmerne struje proizvod $P \cdot n$ je ograničen što je mana (ograničena je maksimalna brzina **za određenu snagu**). Regulacija vučne sile će biti nedisipativna, odnosno mora da postoji energetski pretvarač koji će varirati srednju vrednost napona. Transformator može biti regulacioni (sa otcepima) pa se tako može podešavati napon.

Pretvarač se šematski može prikazati na sledeći način:



Slika br.13.1.10 Principijelna šema vučnog pretvarača

Prema pretvaraču, lokomotive se dele na:

1. diodne lokomotive (sa diodnim pretvaračem),
2. tiristorske lokomotive (sa tiristorskim pretvaračem).

13.2 Diodne lokomotive

Poznato je da je $25kV/50Hz$ najrasprostranjeniji sistem napajanja lokomotiva.

Napon na prolaznom vodu je kod jednosmernog napajanja identičan kao i na kontaktnom vodu, dakle $1,5kV$ ili $3kV$. Kod naizmjeničnog napajanja $25kV/50Hz$ i $15kV/16^{2/3}Hz$ napon se transformiše i na prolaznom vodu iznosi $1,5kV/50Hz$ i $1kV/16^{2/3}Hz$, respektivno.

Postoje lokomotive koje rade na jednosmeran napon. Kod njih je regulacija vučne sile reostatska, disipativna, i električna šema odgovara u potpunosti šemi sa vučnim kolima metroa.

Kod nas su zastupljene lokomotive tipa 441.

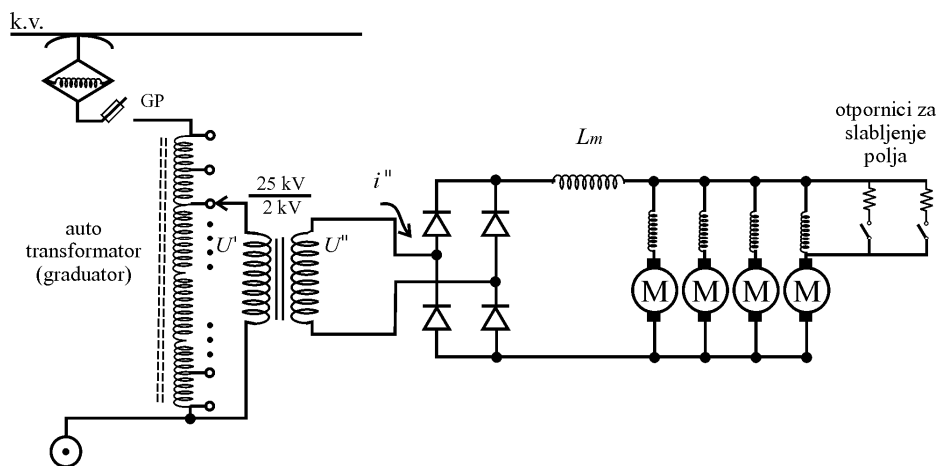
Prva cifra je oznaka primarnog izvora energije:

- 4 – električna
- 6 – dizel – električna
- 7 – dizel – hidraulična (male snage, manevarke)
- 1 – parna vuča
- 2 – šinobus

Druga cifra je broj motora, a treća kazuje kakav je kvalitet izrade i kakva je pouzdanost sklopova.

Sve jednofazne lokomotive se napajaju sa kontaktnog voda $25kV/50Hz$.

Šema za motorni režim rada:



Slika br.13.2.1 Principijelna električna šema pogona diodne lokomotive

Kontrola vučne sile se reguliše nedisipativno i to preko graduatora biranjem otcepa i kao posledica takve konstrukcije javlja se diskontinualna regulacija vučne sile.

Autotransformator (ovde je to graduator) ima 43 otcepa kojim se diskretno reguliše napon U' . Maksimalan napon na sekundaru je do $2kV$ (ograničen je naponom vučnih motora). Struje u graduatoru kod lokomotive 441, koja je snage $S_{nom}=4 \div 6MVA$, su od 250 do 300 A

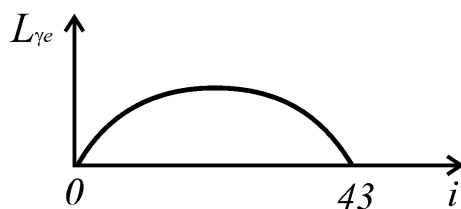
$$U' = \frac{i}{43} \cdot 25kV \quad (12.2.1)$$

$$U'' = \frac{i}{43} \cdot 2kV \quad (12.2.2)$$

Graduator je dosta složen i težak zbog opreme za komutaciju. Transformator 25/2 kV/kV je monofazni, velike snage. On mora da bude konstruisan tako da podnese vibracije i potrese.

Za diodni ispravljač je ključna ekvivalentna induktivnost naizmeničnog kola, čiji jedan deo predstavlja induktivnost rasipanja. Reaktansa kontaktnog voda je promenljiva, postoji podužna induktivnost (obično $0,4 \Omega/km$ nezavisno od napona i

preseka provodnika), a promenljiva je i reaktansa graduatora u zavisnosti od položaja klizača. Zavisnost induktivnosti od položaja klizača data je na slici:



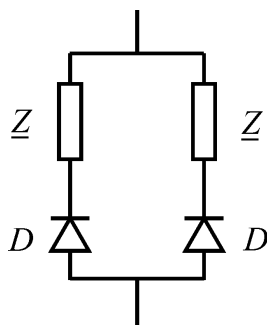
Slika br.13.2.2. Ukupna induktivnost rasipanja u zavisnosti od položaja klizača graduatora

Kod dioda radni napon je oko $3,5kV$ (postoje varijacije napona kontaktnog voda). Komutacija (prebacivanje struje iz jedne u drugu diodnu granu) praćena je prenaponom na inverzno polarisanoj diodi do $4,5kV$.

Nominalni napon motora je $1500V$ (zbog problema komutacije u motoru). Struja kroz motornu prigušnicu L_M je oko $2500A$. Najveća srednja vrednost napona je oko $1800V$.

Diode treba da trpe srednju vrednost struje oko $1250A$. Obično se koriste manje diode (nižeg naponskog nivoa i manje srednje vrednosti struje) koje se redno-paralelno sprežu.

Paralelno vezivanje dioda je prikazano na slici:

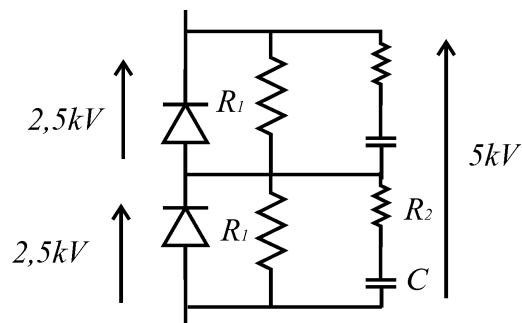


Slika br.13.2.3. Paralelno povezivanje dioda

Impedansa Z je omsko-induktivnog karaktera.

Prag provođenja diode je $0,7V$ i opada sa temperaturom. Ako je manji prag provođenja jedne diode, ona preuzima na sebe veći deo struje, pa se još više greje, dok na kraju ne preuzme svu struju. Stabilizujući efekat unosi unutrašnji otpor diode (na kontaktima, otpor spojeva). Kako struja raste, raste i pad napona, pa je neophodno staviti impedansu Z da bi se struje podjednako raspodelile.

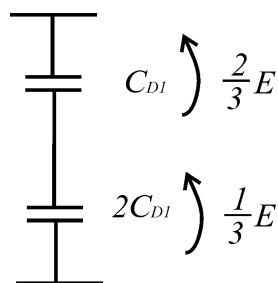
Ostvarivanje redne veze dioda je prikazano na slici:



Slika br.13.2.4. Redno povezivanje dioda

Kada se diode redno vežu ostvaruje se deljenje napona. Inverzno polarisane diode imaju struje curenja koje praktično nisu jednake. Zbog njihovog debalansa dolazi do debalansa napona dioda. Na jednoj diodi će se javiti sav napon i ona probija. Zato se vezuju otpornici za ujednačavanje napona, i struja kroz njih je 3 do 4 puta veća od struje curenja dioda.

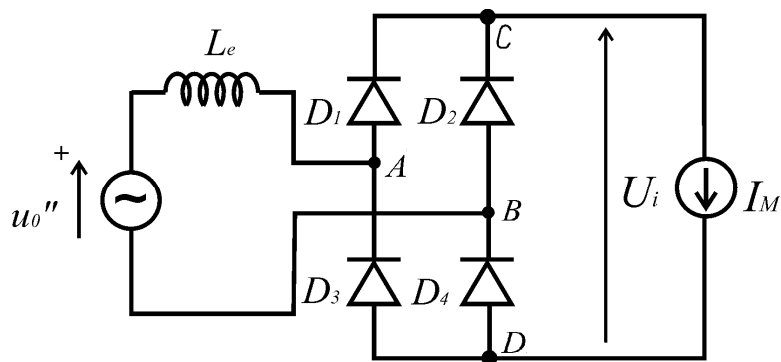
Diode imaju i parazitne kapacitivnosti koje nisu iste. Kada je sklop inverzno polarisan i jedna ima duplo manju kapacitivnost, inverzni naponski impuls se raspodeli u vremenu $t=0$ kao na slici:



Slika br.13.2.5. Nejednaka raspodela napona na parativnim kapacitetima

Ovo dovodi do kratkotrajnog proboja. U probiju (naponski probij ne mora biti destruktivan kvar) struja raste, jako polje u pn spoju dovodi do zaletanja elektrona koji udaraju u čvorove rešetke i dovode do ubrzanog starenja diode. Pri svakoj komutaciji bi dolazilo do ovog malog proboja. Da bi se ovo sprečilo, paralelno se veže kondenzator, koji je 3 do 5 puta većeg kapaciteta od parazitnog. On postaje dominantan i poništava varijacije parazitne kapacitivnosti. Ovim kondenzatorima se redno vežu otpornici za umanjenje struje kondenzatora.

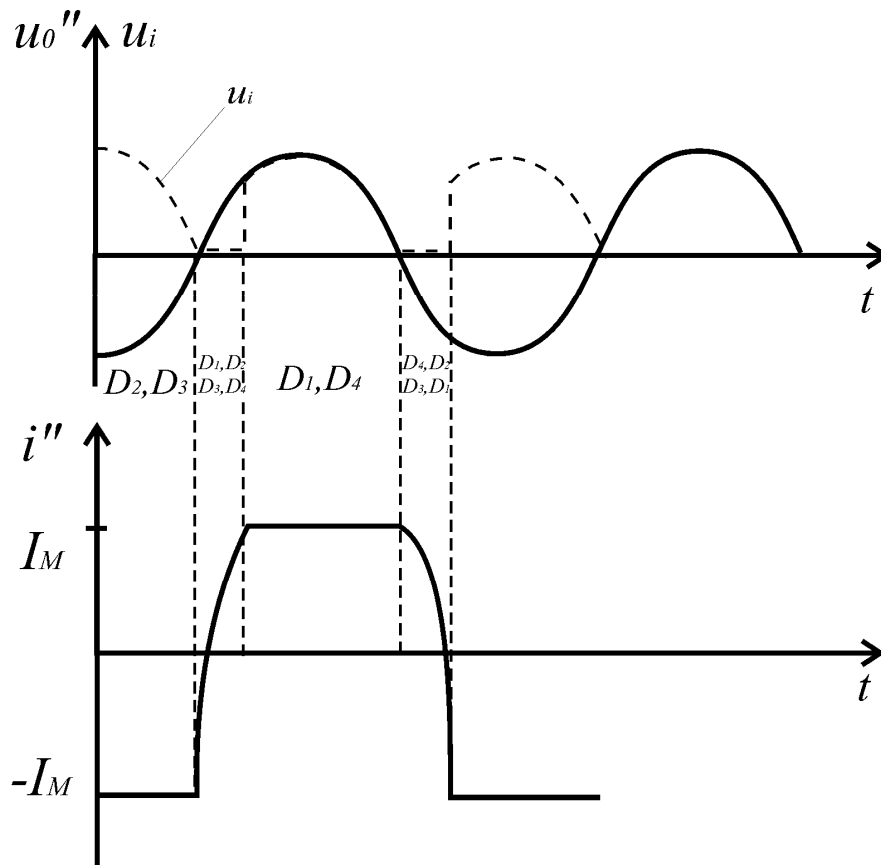
Nas interesuje srednja vrednost napona koji dolazi na motore. Sekundarni napon se može ekvivalentirati elektromotornom silom i unutrašnjom impedansom, koja je dominantno induktivna (to su svedene reaktanse na sekundar transformatora svih elemenata do izvora; uključene su reaktanse transformatora, graduatora, kontaktne mreže od napojne stanice do lokomotive, itd.)



Slika br.13.2.6. Principijelna električna šema napajanja motora JS

Ako je motorna prigušnica beskonačno velika onda je struja konstantna, odnosno imamo strujni ponor, kojim ekvivalentiramo motor sa pobudnim namotajem i motornu prigušnicu.

Grafici zavisnosti napona i struje od vremena su na slici:



Slika br.13.2.7. Vremenski oblici napona i struje motora

Kada je napon $u_0'' < 0$ provode diode D_2 i D_3 , struja teče u strujni ponor pa u izvor. Ispravljeni napon je $-u_0''$. Napon počinje da menja smer. D_1 i D_4 postaju direktno polarisane, pa sve diode provode u jednom kratkom vremenskom vremenskom intervalu t_k (na slici je taj period razvučen). Tada je izlazni napon na nuli jer se zanemaruje pad napona na diodama. Na početku komutacije $i'' = -I_M$ ali je njena promena određena sa

$$L_e \frac{di''}{dt} = u_0'' \quad (12.2.3)$$

Pošto sve četiri diode provode, tačke A i B su praktično u kratkom spoju. Napon u_0'' se sinusno menja, struja ima tendenciju da raste po zakonu $1 - \cos \omega t$, tako da čim se dostigne I_M komutacija prestaje i diode koje su do tada provodile se isključuju. Posmatra se balans struje u čvoru C :

$$i_{D1} + i_{D2} = I_M \quad (12.2.4)$$

$$i'' + i_{D3} = i_{D1} \quad (12.2.5)$$

Iz razloga simetrije je $i_{D2} = i_{D3}$. Sledi da je:

$$2i_{D2} = I_M - i'' \quad (12.2.6)$$

Vidi se da D_2 prestaje da provodi kada je $i'' = I_M$ ali zbog relativno velike količine naelektrisanja u pn spoju, i_{D2} mora da bude malo negativno kako bi “izvuklo” to naelektrisanje. Paralelno treba stavljati RC članove da ublaže prenapone u tim špicevima struje.

Na “per unit” bazi: $X''_e = 0.15 \div 0.25$

$$S \sim \int_{t_x}^{t_x+t_k} u dt = 2L_e'' I_M \quad (12.2.7)$$

Pad napona zbog induktivnosti u naizmeničnom kolu:

$$\Delta u_i = \frac{2I_M L_e}{\frac{T}{2}} = \frac{2X_e'' I_M}{\pi} \quad (12.2.8)$$

Srednja vrednost napona na motorima diodne lokomotive:

$$U_{SR}^M = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot 2kV \cdot \frac{i}{43} - \frac{2}{\pi} X_e'' I_M \quad (12.2.9)$$

Fazno kašnjenje:

$$\angle(U'', I'') \approx \frac{\alpha_k}{2} \sim Q \quad (12.2.10)$$

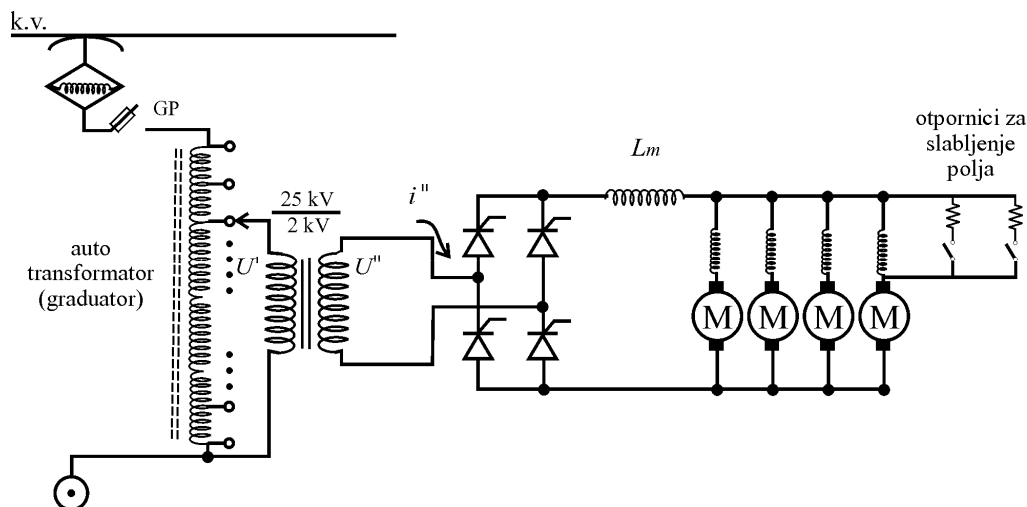
gde je Q mala reaktivna snaga na sekundarnoj strani.

Regulacija vučne sile ostvaruje se delovanjem na stepen regulacije. Takav način regulacije je nedisipativan i diskontinualan. Loše je iskorišćenje adhezije. Ako se brzina povećava, napon raste, uključuje se sledeći stepen graduatora, skokovito se prelazi na sledeću karakteristiku. Broj stepena graduatora je 43 i njih nije jednostavno izraditi. Prave se od čitavog niza prekidača i impedansi.

Pošto se napon na motoru može podešavati samo skokovito imamo pulsacioni (skokoviti) momenat, odnosno takav karakter vučne sile, što je loša osobina. Ipak, prisutna je fina regulacija jer ima 43 karakteristike i udar je relativno mali pri prelasku sa karakteristike na karakteristiku. Loša osobina je još što ovde nema rekuperativnog kočenja jer struja ne može menjati smer niti napon može da bude negativan. Zato ovde treba specijalna instalacija sa otpornikom za kočenje. Tada se potpuno odvaja ispravljač od motora. Zbog ovoga se diodne lokomotive primenjuju na ravnim trasama. Loša osobina je i to što se ugrađuje veliki broj prekidača. U savremenim diodnim lokomotivama se ne radi diskontinualno šantiranje polja.

13.3 Tiristorske lokomotive

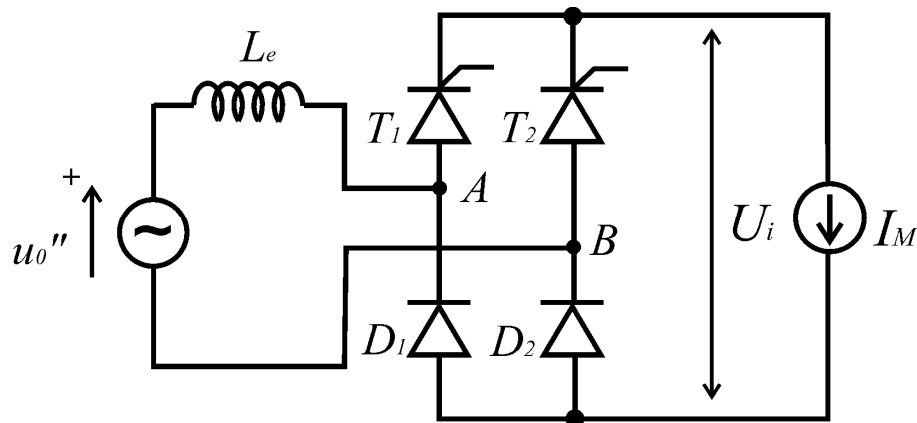
Električna šema podseća na šemu diodnih lokomotiva u motornom režimu rada. Graduator ima 25 izvoda (otcepa).



Slika br.13.3.1. Principijelna električna šema napajanja motora JS u tiristorskoj lokomotivi

Uvode se da bi se otklonile mane diodnih lokomotiva, koje nemaju mogućnost rekuperacije pa zato koče otpornički. Kod tiristorskih lokomotiva se srednja vrednost napona na izlazu menja kotinualno. Koristi se monofazni tiristorski most koji može biti poluupravljivi i punoupravljivi. Pri korišćenju punoupravljivog mosta može se izborom ugla paljenja većeg od 90° na izlazu imati napon manji od nule, pri čemu je struja uvek veća od nule, čime se obezbeđuje vraćanje energije nazad u mrežu. Ovde, dakle, postoji rekuperativno kočenje (tada se prevezuju pobudni namotaji da bi im bila nezavisna pobuda – **jedino je tada stabilno kočenje rednog motota**). I ovde je zadržan autotransformator zbog umanjenja prividne i reaktivne snage na nivou kontaktnog voda.

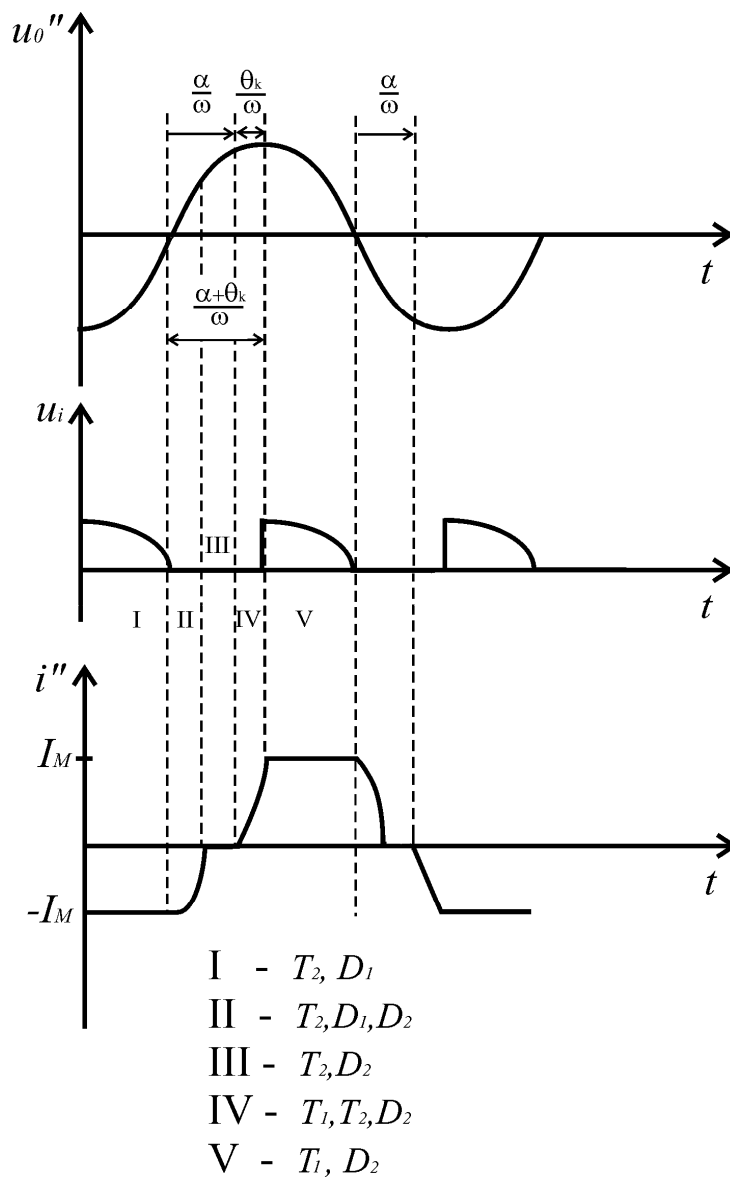
Posmatramo sledeću šemu sa poluupravljivim tiristorskim mostom:



Slika br.13.3.2. Uprošćena električna šema napajanja motora JS u tiristorskoj lokomotivi (sa poluupravljivim mostom)

Razlika u šemi u odnosu na diodni most je takva da se umesto dioda na odgovarajućim mestima koriste tiristori.

Diode provode kada su polarisane, dok je tiristore potrebno još i dodatno pobuditi.



Slika br.13.3.3. Vremenski oblici napona i struje kada se motor napaja iz poluupravljivog mosta

Vreme paljenja tiristora je posle α/ω . Zanimaraju se padovi napona na tiristorima i diodama jer su ovde naponi u_0'' oko $1000V$ ili $1500V$.

T_1 se pali kad je direktno polarisan i kada se dovede impuls na gejt, a to se čini posle vremena α/ω . D_2 počinje da vodi čim je direktno polarisana.

Za vreme na grafiku označeno (II), postoji kratak spoj između tačaka A i B. Izlazni napon je tada nula (odnosno $-2V$ zbog padova napona). Preko L_e se kratko spaja

izvor. Javlja se struja vremenskog oblika $I \cos \omega t$. Dioda D_1 se gasi jer njena struja postaje nula u toku komutacije. Nadalje vode T_2 i D_2 a mrežna struja i'' je nula dok se ne upali T_1 . T_1 počinje da provodi i počinje nova komutacija kada provode T_1 , T_2 i D_2 . Napon na izlazu je i dalje nula. Za struju važi:

$$L_e \frac{di''}{dt} = u_0'' \quad (12.3.1)$$

Opet se kratko spaja ulazni napon preko reaktanse L_e (ona obara strminu i smanjuje maksimalnu vrednost napona). Struja se brže menja, skoro linearno, jer je napon u tom delu malo promenljiv. Kada se dostigne I_M gasi se T_2 .

$$i_{T2} = I_M - i'' \quad (12.3.2)$$

$$i'' = i_{T1} \quad (12.3.3)$$

Izraz za srednju vrednost izlaznog napona je:

$$U_{isr} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} (1 + \cos \alpha) U_0'' - \frac{L_e \omega}{\pi} I_M = \frac{\sqrt{2}}{\pi} (1 + \cos(\alpha + \theta_k)) U_0'' \quad (12.3.4)$$

Pretpostavlja se da su komutacije trenutne pa sekundarna struja kao da ima pravougaoni oblik. Ovu pretpostavku usvajamo radi uprošćenja.

$$I'' = I_M \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi}} \quad (12.3.5)$$

Prividna snaga pri polasku je mala. Izraz za prividnu snagu je:

$$S = U_0'' \cdot I_M \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi}} \quad (12.3.6)$$

Zanemarujemo gubitke snage na tiristorima, diodama, u toku komutacije, pa je:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T \sqrt{2} U_0'' \sin \omega t \cdot i''(t) dt = \frac{\sqrt{2}}{\pi} I_M (1 + \cos \alpha) U_0'' - \frac{L_e \omega}{\pi} I_M^2 \quad (12.3.7)$$

Reaktivna snaga:

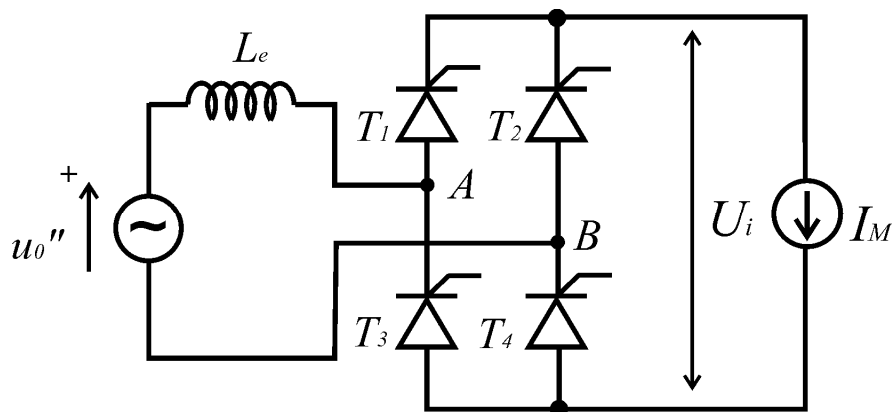
$$Q = \frac{1}{T} \int_0^T \sqrt{2} U_0'' \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \cdot i''(t) dt = \frac{\sqrt{2}}{\pi} I_M U_0'' \sin \alpha \quad (12.3.8)$$

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (12.3.9)$$

D je snaga distorzije, tj. prividna snaga usled viših harmonika.

Ako nam treba mali napon, uzimamo α blisko π .

Pri korišćenju poluupravljivog mosta nema rekuperacije ($P \geq 0$), nema rekuperativnog kočenja lokomotive. Zbog toga se koristi punoupravljivi tiristorski most. Šema je prikazana na sledećoj slici:



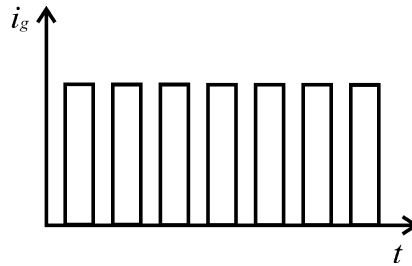
Slika br.13.3.4. Uprošćena električna šema napajanja motora JS u tiristorskoj lokomotivi (sa punoupravljivim mostom)

Okidanje tiristora se vrši povorkom impulsa manje širine a ne jednim impulsom, i to zbog:

-smanjenja disipacije na tiristorima,

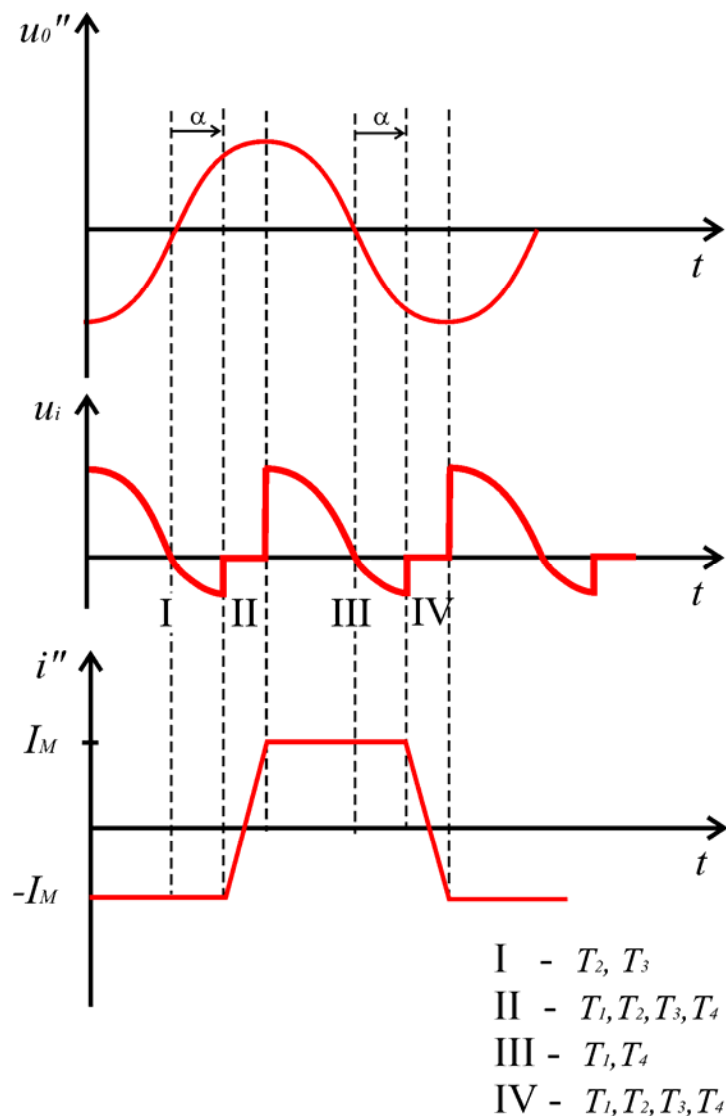
-ako ne uspe jedan, sledeći impuls će uspeti da upali tiristor.

Pobuđivanje **tiristora se vrši** strujom gejtja.



Slika br.13.3.5. Vremenski oblik struje gejtja

Vremenski dijagrami promena napona i struje su prikazani na sledećoj slici:



Slika br.13.3.6. Vremenski oblici napona i struje kada se motor napaja iz punoupravljivog mosta

Ugao paljenja je isti za sve tiristore, okidanje je simetrično, istovremeno po dijagonali mosta. Ugao paljenja α može maksimalno iznositi 150° do 160° . Razlog zbog čega se ne prelazi preko ovih vrednosti je poštovanje vremena odmora tiristora, jer je potrebno vreme (reda μs) da se izvrši rekombinacija manjinskih nosilaca. Ukoliko se ovo vreme ne ispoštuje doći će do kratkog spoja na motorima lokomotive. Trajanje komutacije zavisi i od rastojanja od podstanice i stepena graduatora ([reaktanse ovih elemenata](#)). Za veliku udaljenost i za graduator na srednjem položaju maksimalan ugao paljenja je 120° a za bolje uslove može i do 165° .

Srednja vrednost ispravljenog napona je:

$$U_{isr} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_0'' \cos \alpha - \frac{2X}{\pi} I_M \quad (12.3.10)$$

Izrazi za aktivnu, reaktivnu i prividnu snagu na naizmeničnoj strani su:

$$P = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_M U_0'' \cos \alpha - \frac{2X}{\pi} I_M^2 \quad (12.3.11)$$

$$Q = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_M U_0'' \sin \alpha \quad (12.3.12)$$

$$S = U_0'' I_M \quad (12.3.13)$$

Kritičan je režim polaska, tada je najveća struja I_M . Sada je velika prividna snaga a kod poluupravljivog je mala. Zbog rekuperativnog kočenja stavljamo četiri tiristora. Ako most upravljamo tako da se ponaša kao poluupravljivi u motornom režimu, na gejt T_3 i T_4 dovodimo impuls sa $\alpha=0$. Oni se ponašaju kao diode, izrazi su isti kao i za poluupravljivi most.

Regulacija srednje vrednosti napona se vrši preko ugla paljenja i promenom stepena graduatora.

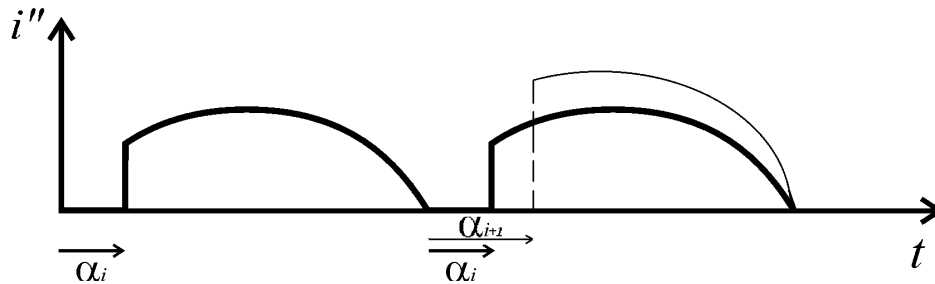
Tiristori u šemi su [ustvati, u praksi](#) redno-paralelne veze grupe tiristora (9 do 12) sa RC članovima za obuzdavanje prenapona i otpornicima za uravnotežavanje napona. Dodatna komplikacija je distribucija okidnih impulsa jer je neophodno da svi tiristori dobijaju impuls za okidanje u istom trenutku. Moraju se, dakle, istovremeno uključivati. Vrlo često se koriste tiristori koji se okidaju svetlošću, tada je zanemarljivo kašnjenje. Optička vlakna su zamena za gejt. Direktno se osvetljava p oblast zahvaljujući fotoefektu izbijaju se manjinski nosioci - elektroni. Ako se p oblasti svih tiristora osvetljavaju iz istog optičkog vlakna, obezbeđuje se istovremeno paljenje tiristora. Motorna prigušnica je dva do tri puta veća, od one u diodnom

mostu, jer je 100Hz -na komponenta napona veća kod tiristorskog nego kod diodnog mosta.

Reaktivna snaga poluupravljivog mosta ima maksimum za $\alpha=\pi/2$ što je isto kao i za punoupravljivi most, ali je dvostruko manja nego kod punoupravljivog. Reaktivna snaga je srazmerna uglu paljenja α (tj. $\sin\alpha$). Kako god upravljali lokomotivom, povoljno je održavati $\alpha\sim 0$ u motornom režimu rad, ili $\alpha\sim\pi$ u generatorskom režimu rada. Srednja vrednost napona zavisi od α i stepena graduatora i , i za poluupravljivi most iznosi;

$$U_{sr} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{i}{25} \cdot 2[kV] \cdot (1 + \cos\alpha) - \frac{1}{\pi} X_e I_M \quad (12.3.14)$$

Ako uzmemo $i+1$ stepen umesto i -tog povećaće se vršna vrednost napona pa je potrebno povećati α_i na α_{i+1} pošto srednja vrednost napona mora biti *const*.



Slika br.13.3.7. Pri promeni stepena graduatora mora se promeniti ugao vođenja mosta da ne bi došlo do skokovite promene napona na motoru

$$U_{sr} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{i}{25} \cdot 2[kV] \cdot (1 + \cos\alpha_i) - \frac{1}{\pi} X_e I_M = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{i+1}{25} \cdot 2[kV] \cdot (1 + \cos\alpha_{i+1}) - \frac{1}{\pi} X_e I_M \quad (12.3.15)$$

Motor neće primetiti nikakvu promenu pri prelasku sa i -tog na $i+1$ stepen graduatora ako istovremeno promenimo α_i na α_{i+1} , tako da je:

$$i(1 + \cos\alpha_i) = (i+1)(1 + \cos\alpha_{i+1}) \quad (12.3.16)$$

Mi ćemo se zadržati na i -tom stepenu graduatora sve dok je povećanje U_{sr} moguće ostvariti smanjenjem α_i . U trenutku $\alpha_i=0^\circ$ ostvariće se maksimalno U_{sr} sa i -tim stepenom graduatora. Tada radimo dve operacije: sa i -tog prelazimo na $i+1$ stepen graduatora (povećava se vršna vrednost), a ugao α_i povećavamo na

$$\alpha_{i+1} = \arccos \frac{i-1}{i+1} \quad (12.3.17)$$

Mešovitom regulacijom omogućeno je da kontinualno menjamo napon pri $\alpha \in \left[0, \arccos \frac{i-1}{i+1}\right]$ uz malu reaktivnu snagu (α je uzanoj zoni oko 0°).

Za $i=0$ nema napona, znači lokomotiva je isključena.

Za $i=1$ sledi da $\alpha \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right]$, ali je struja kontaktnog voda:

$$i_{KV} = \frac{i}{25} i' = \frac{i}{25} \frac{2}{25} \left[\frac{kV}{kV} \right] i'' \quad (12.3.18)$$

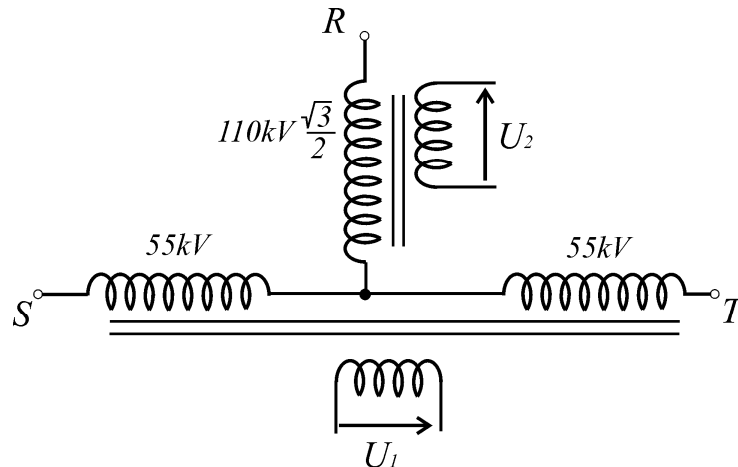
mnogo mala. Struja sekundara se preslikava na kontaktni vod sa $1/25$ tako da se štedi kontaktni vod u pogledu prividne i reaktivne snage.

Pri polasku, napon na motoru je relativno mali ($U_m \sim 150V$). Možemo podesiti ugao paljenja na vrednost blizu nuli ($\alpha \sim 0$). Zato ćemo uzeti otecep koji daje mali napon ($i=2$ ili 3). Tada je:

$$i_{KV} = \frac{2}{25} i' = \left(\frac{2}{25} \right)^2 i'' \quad (12.3.19)$$

Odavde se vidi da iako je pri polasku i'' veliko ($3000A$), i_{kv} ostaje ispod $100A$.

Ovakvo opterećenje (misli se na jednofazne lokomotive generalno) za prenosnu mrežu je nesimetrično i zbog toga se upotrebljava Skotov transformator za simetriranje opterećenja.



Slika br.13.3.8. Principijelna električna šema Skotovog transformatora. Ima trofazni primar sa dva monofazna sekundara

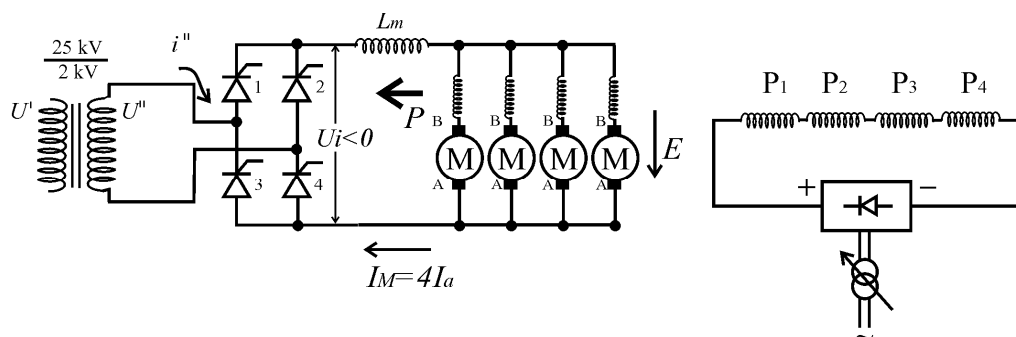
Osobina Skotovog transformatora je ako na svakom sekundaru priključimo isto opterećenje, tada će opterećenje trofazne mreže biti simetrično. (Ovo nam je potrebno zbog zahteva elektroenergetskog sistema i očuvanja rada sinhronih generatora.)

13.4 Rekuperativno kočenje

Pri rekuperativnom kočenju kinetička energija se pretvara u električnu energiju. (Za 1000t negde oko 50kWh se vraća nazad u mrežu.) Ukoliko nema rekuperacije, sva kinetička energija bi išla na zagrevanje kočnih papučica i točkova što dovodi do uništavanja ležajeva i kočnih papučica. (Zbog toga, na stanicama vidimo pregledača kola sa čekićem u ruci koji proverava stanje ležajeva udaranjem u točkove voza.)

Lokomotiva vraća energiju u kontaktni vod. U podstanici kod sistema za $25kV/50Hz$ imamo prenosnu mrežu $3 \times 110kV$, jednofazni transformator $110/25 kV/kV$ koji pomoću posebnog užeta napaja kontaktni vod.

Kod jednofazne lokomotive nema problema sa receptivnošću već samo sa naponskom stabilnošću i reaktivnom snagom. Da bi lokomotiva mogla da koči, električni elementi šeme se moraju prevezati.

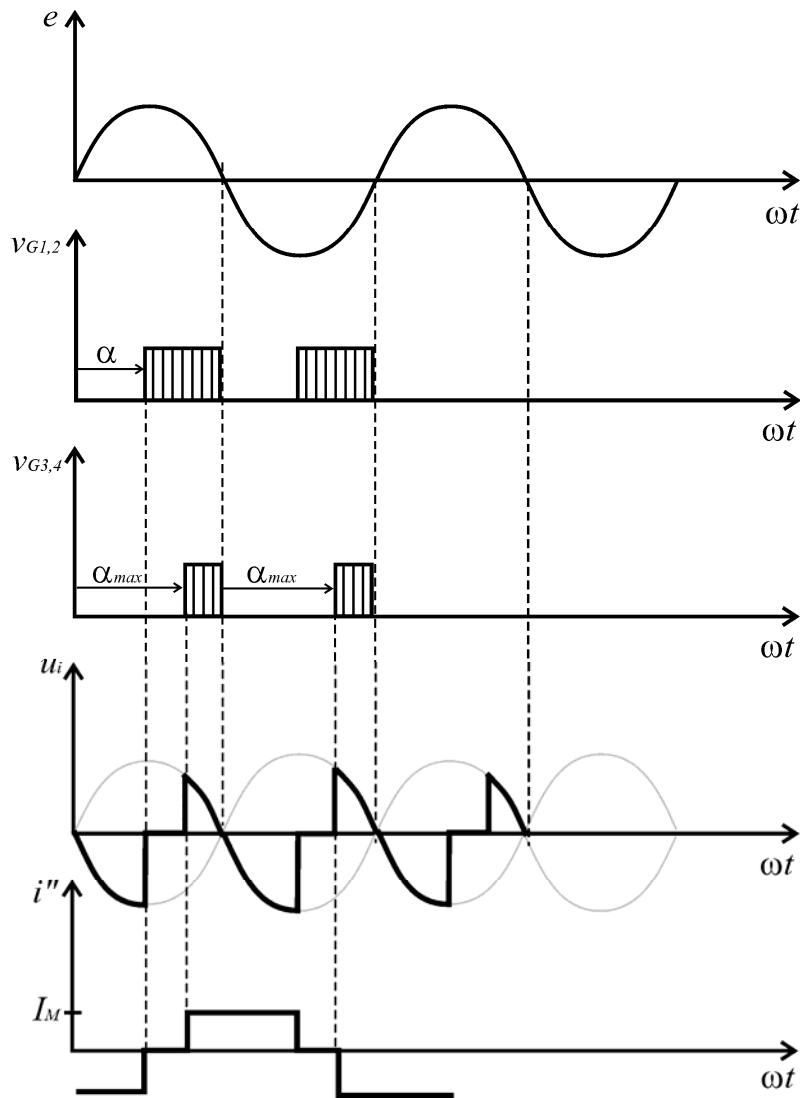


Slika br.13.4.1. Uprošćena električna šema napajanja motora JS u tiritorskoj lokomotivi sa puno upravljivim mostom (moguća rekuperacija)

Tiristorski most nam omogućuje da rekuperativno kočimo zato što je $U_i \sim \cos \alpha$ i za $\alpha > \pi/2$ naš ispravljen napon je negativan. Struja ima isti smer, ali je napon negativan, pa je protok snage u suprotnom smeru. Za ostvarivanje rekuperacije na motorima potrebno je ukrstiti četkice što nam odgovara zato što ukrštanjem četkica elektromotorna sila biva dovedena u balans sa U_i , koji je negativan. Pobuda se realizuje kao nezavisna. Upravljanje tiristorima kod rekuperativnog kočenja mora da bude asimetrično:

$$\alpha_{T3} = \alpha_{T4} = \alpha_{max}; \quad \alpha_{T1} = \alpha_{T2} = \alpha_{varijabilno} \leq \alpha_{max} \quad (12.4.1)$$

Vremenske zavisnosti pojedinih električnih veličina date su na sledećim graficima:



Slika br.13.4.2. Vremenski oblici napona i struje kada se motor napaja iz punoupravljivog mosta

Srednja vrednost izlaznog napona se može izračunati kao:

$$U_{sr}[V] = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{i}{25} 2000 \cdot (\cos \alpha_{1,2} + \cos \alpha_{3,4}) - \frac{X_e''}{\pi} I_M \quad (12.4.2)$$

$$U_{sr}[kV] = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{i}{25} 2000 \cdot (\cos \alpha + \cos \alpha_{\max}) - \frac{X_e''}{\pi} I_M \quad (12.4.3)$$

Fazni stav struje je pomeren u odnosu na napon više od $\pi/2$. Znači energija teče ka kontaktnoj mreži. Zahvaljujući asimetričnom okidanju, postoje intervali kada je struja

jednaka nuli pa u skladu sa izrazom za reaktivnu snagu imamo manju reaktivnu snagu nego da smo ostali pri simetričnom okidanju.

Naponsku regulaciju ostvarujemo promenom ugla α . Mešovitom regulacijom (variranjem ugla α i korišćenjem graduatora) može se izvršiti smanjenje reaktivne snage tako što se teži da $\sin\alpha$ bude što manje, odnosno da α bude što bliže uglu π (u motornom režimu teži se da α bude blisko nuli).

Jednačina naponskog bilansa:

$$E - R_a \frac{I_M}{4} - R_{LM} I_M + \frac{\sqrt{2}}{\pi} U'' (\cos \alpha + \cos \alpha_{\max}) - \frac{X_e''}{\pi} I_M = 0 \quad (12.4.4)$$

Armaturna struja jednog motora:

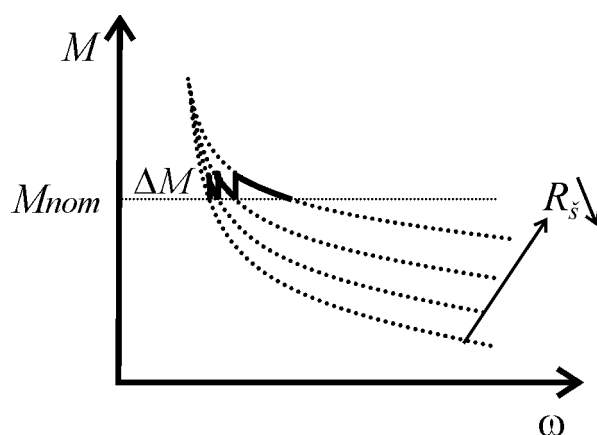
$$I_M = \frac{E + \frac{\sqrt{2}}{\pi} U'' (\cos \alpha + \cos \alpha_{\max})}{\frac{R_a}{4} + R_{LM} + \frac{X_e''}{\pi}} \quad (12.4.5)$$

za slučaj sa slike, odnosno broj motora je 4.

Maksimalna brzina lokomotive pri kojoj se može rekuperativno kočiti (bez slabljenja polja) zavisi od udaljenosti od podstanice. Ako se nalazimo daleko od podstanice, veća je induktivnost L_e , komutacija duže traje pa je potrebno i veće vreme odmora tiristora što dovodi do ograničenja ugla paljenja $\alpha_{\max}$. Važi i obrnuto, što smo bliže podstanici uslovi su povoljniji.

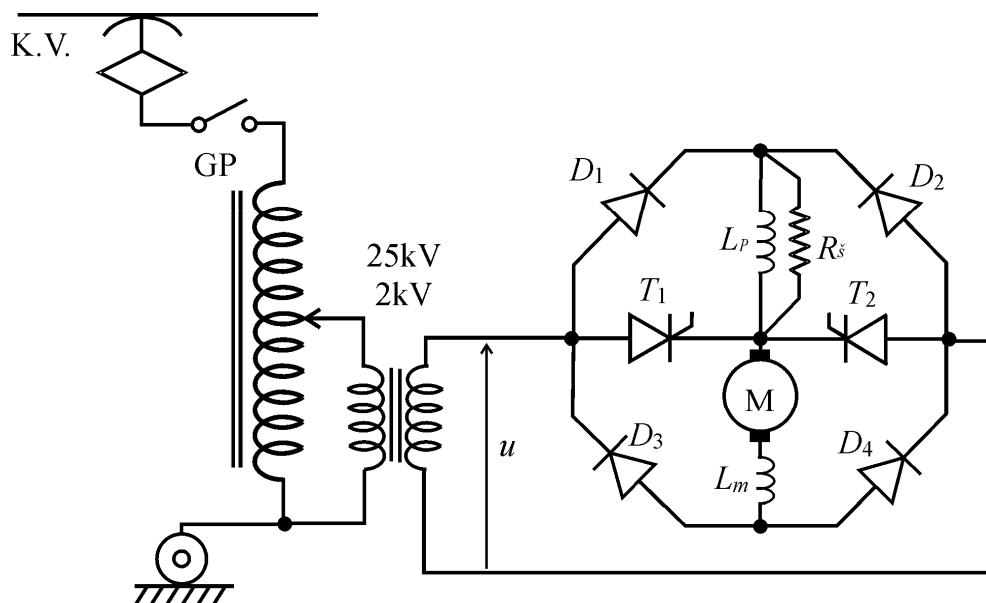
13.5 Tiristorska implementacija slabljenja polja kod jednofaznih lokomotiva

Da bi se postigla brzina veća od nominalne javlja se potreba za slabljenjem polja, što se u slučaju rednog motora vrši promenom napona napajanja. Moguće je i šantiranje polja otpornikom. Loša strana šantiranja polja je skokovita promena momenta, koja se odražava na vučnu silu, a posledice su habanje prenosnog mehanizma i neugodna vožnja za putnike.



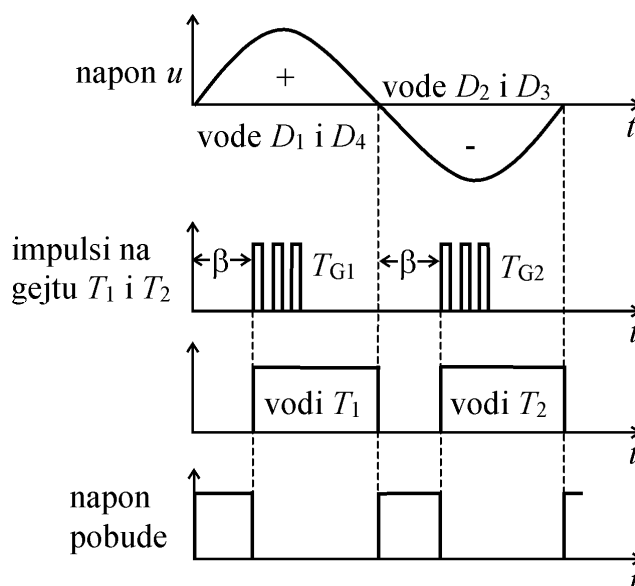
Slika br.13.5.1. Uticaj slabljenja polja na mehaničku karakteristiku motora JS sa rednom pobudom.

Upotrebom tiristora u ispravljačkim mostovima i kontinualnom promenom ugla paljenja α može se postići kontinualna promena napona napajanja. Na slici vidimo šemu jednog takvog rešenja:



Slika br.13.5.2. Izgled električna šeme veza

Princip rada se objašnjava na sledeći način:



Slika br.13.5.3. Vremenski oblici napona na ulazu na pobudi i impulsa na gejt

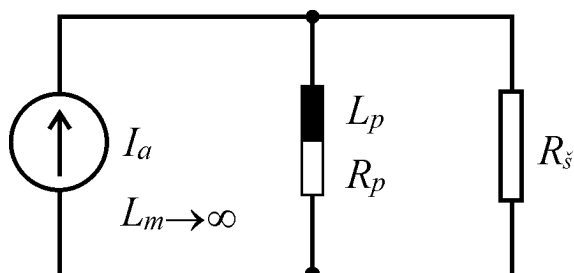
U toku pozitivne poluperiode vode D_1 i T_1 (koji provodi sa kašnjenjem β). Dok vodi T_1 struja pobude motora je manja. To znači da srednja vrednost struje pobude opada sa porastom ugla β .

Uključivanje tiristora ne prekida struju kroz diodu D_1 jer pobudni namotaj ima veliku induktivnost, ali će napon na pobudnom namotaju biti jednak nuli.

Razmatramo slučajeve:

$$1^\circ t \in [0, \frac{\beta}{\omega}] \text{ (tiristori ne vode)}$$

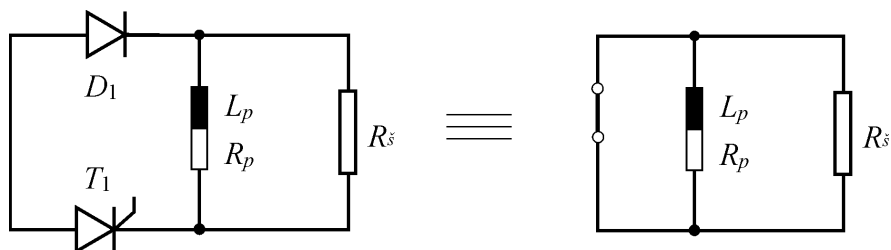
Šema sada ima izgled:



Slika br.13.5.4. Principijelna električna šema kada ne vode tiristori

L_m je veliko, pa je struja kroz pobudu ista kao armaturna struja, odnosno promene pobudne struje su jako male, zanemarive.

$$2^\circ t \in [\frac{\beta}{\omega}, \frac{\pi}{\omega}] \text{ (vode } T_1 \text{ i } D_1)$$



Slika br.13.5.5. Principijelna električna šema kada vode i tiristor i dioda

Promena pobudne struje je zanemarljiva, a L_p je veliko, pa srednja vrednost napona na induktivnosti iznosi:

$$U_L^{sr} = \left(L_p \frac{di_p}{dt} \right)_{sr} = 0 \quad (12.5.1)$$

Dalje imamo:

$$\beta U_{sr}^{(1)} + (\pi - \beta) U_{sr}^{(2)} = 0 \quad (12.5.2)$$

Pošto je:

$$U_{sr}^{(1)} = R_s (I_a - I_p) - R_p I_p \quad (12.5.3)$$

$$U_{sr}^{(2)} = -R_p I_p \quad (12.5.4)$$

sledi:

$$\beta R_s (I_a - I_p) - \beta R_p I_p + \beta R_p I_p - \pi R_p I_p = 0 \quad (12.5.5)$$

Iz poslednje jednakosti srednja vrednost pobudne struje je:

$$I_p = \frac{\beta R_s}{\beta R_s + \pi R_p} I_a = a I_a \quad (12.5.6)$$

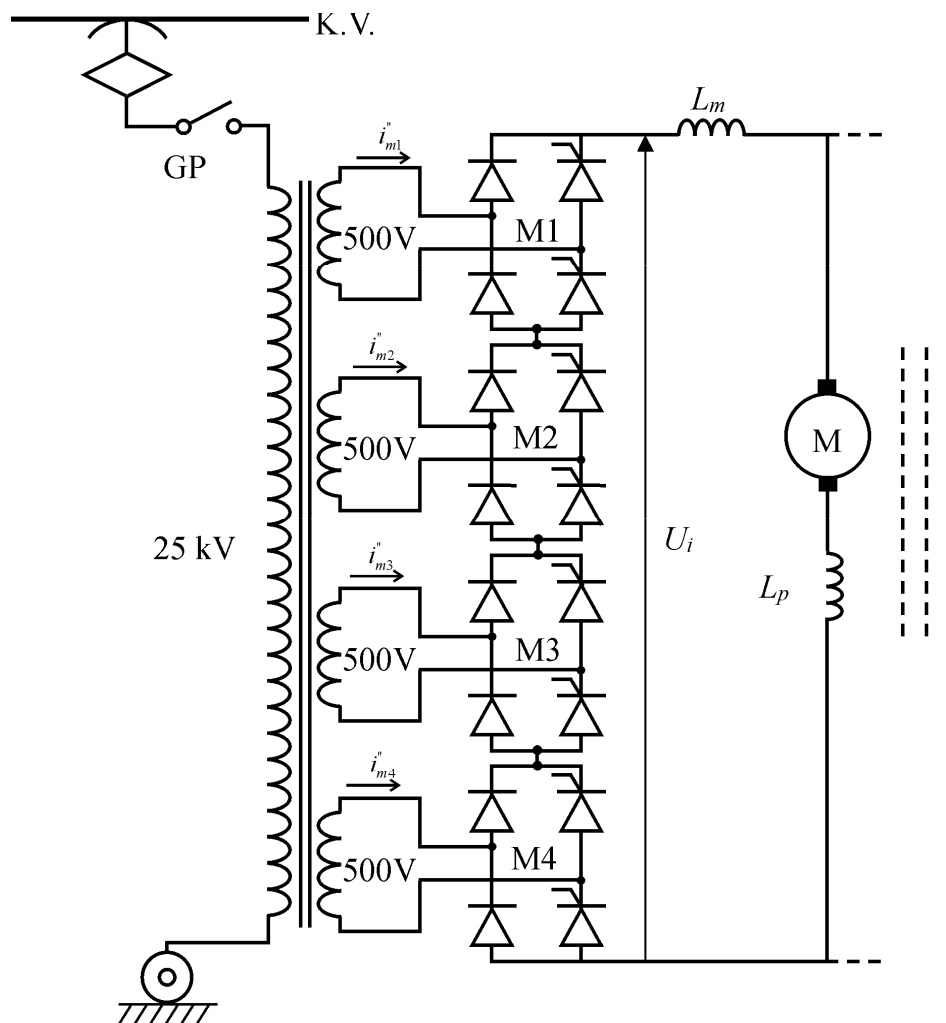
Veličina a je odnos slabljenja polja:

$$a = \frac{\beta R_s}{\beta R_s + \pi R_p} \quad (12.5.7)$$

Pobudna struja (odnosno ekvivalentni pobudni napon), sadrži naizmeničnu komponentu koja je nepoželjna, pa zato postoji induktivni šant R_s koji treba da prihvati naizmeničnu komponentu struje i time onemogući njen prolazak kroz pobudni namotaj. Ova šema se može primeniti i kod tiristorskog ispravljačkog mosta, ali se tada T_1 i T_2 pale za ugao β iza ugla paljenja ispravljačkih tiristora α .

13.6 Augijeva sprega

Graduator je teška naprava i zahteva česta održavanja odcepa. U nemogućnosti potpunog eliminisanja graduatora (zbog reaktivne snage), pribegava se raznim rešenjima. Jedno od rešenja je Augijeva sprega, koja je zasnovana na izvođenju većeg broja sekundara transformatora $25/2\text{ kV/kV}$ i priključivanjem po jednog tiristorskog mosta na svaki od tih sekundara.



Slika br.13.6.1. Principijelna električna šema napajanja motora JS preko Augijeve sprega

$M1, M2, M3, M4$ – punoupravljivi tiristorski mostovi sa asimetričnim okidanjem (tiristori sa uglom paljenja $\alpha = 0^\circ$ su nacrtani kao diode).

Ako je potreban ispravljeni napon u opsegu

$$U_i \in [0, \frac{1}{4}U_{i\max}] \quad (12.6.1)$$

tada je

$$\alpha_{M2} = \alpha_{M3} = \alpha_{M4} = \pi \quad (12.6.2)$$

odnosno ovi mostovi neće praviti napon na sebi (motorna struja se zatvara kroz diode na mostovima $M2, M3, M4$), a kao posledica toga je da nema struja sekundara

$$i_{M2}'' = i_{M3}'' = i_{M4}'' = 0 \quad (12.6.3)$$

Zavisnost izlaznog napona od ugla paljenja α_{M1} je

$$U_i \cong \frac{U}{8} (1 + \cos \alpha_{M1}) \quad (12.6.4)$$

Prividna S i reaktivna snaga Q prvog sekundara je proporcionalna prividnoj S' i reaktivnoj snazi Q' kada postoji samo jedan sekundar od $2kV$:

$$S \sim \frac{1}{4}S', \quad Q \sim \frac{1}{4}Q' \quad (12.6.5)$$

Ako je potreban ispravljeni napon u opsegu

$$U_i \in [\frac{1}{4}U_{i\max}, \frac{1}{2}U_{i\max}] \quad (12.6.6)$$

tada je

$$\alpha_{M1}=0, \quad \alpha_{M3}=\alpha_{M4}=\pi \quad (12.6.7)$$

odnosno mostovi $M3$ i $M4$ neće praviti napon na sebi (motorna struja se zatvara kroz diode na mostovima $M3$ i $M4$), a kao posledica toga je

$$i_{M3}''=i_{M4}''=0, \quad U_{iM1}=\frac{1}{4}U_{i\max} \quad (12.6.8)$$

Zavisnost izlaznog napona od ugla paljenja α_{M2} je

$$U_{iM} \cong -\frac{U_{i\max}}{4} + \frac{U_{i\max}}{8} (1 + \cos \alpha_{M2}) \quad (12.6.9)$$

Samo drugi most generiše reaktivnu snagu Q koja je proporcionalna $\sin \alpha$:

$$Q \sim \sin \alpha \quad (12.6.10)$$

Ako je potreban ispravljeni napon u opsegu

$$U_i \in [\frac{1}{2}U_{i\max}, \frac{3}{4}U_{i\max}] \quad (12.6.11)$$

tada je

$$\alpha_{M1}=\alpha_{M2}=0, \quad \alpha_{M4}=\pi \quad (12.6.12)$$

odnosno most $M4$ neće praviti napon na sebi (motorna struja se zatvara kroz diode mosta $M4$), a kao posledica toga je

$$i_{M4}''=0, \quad U_{iM1}=U_{iM2}=\frac{1}{4}U_{i\max} \quad (12.6.13)$$

Zavisnost izlaznog napona od ugla paljenja α_{M2} je

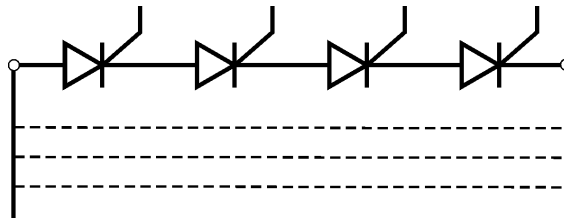
$$U_{iM} \cong \frac{U_{i\max}}{2} + \frac{U_{i\max}}{8} (1 + \cos \alpha_{M3}) \quad (12.6.14)$$

Samo treći most generiše reaktivnu snagu Q koja je proporcionalna $\sin \alpha$:

$$Q \sim \sin \alpha \quad (12.6.15)$$

Ova šema samo na prvi pogled troši puno poluprovodničkih komponenata, jer u ranijim šemama sa graduatorom jednom oznakom tiristora ukazivalo se da je na tom mestu više redno-paralelnih veza tiristora. Ovde je izbegnut graduator.

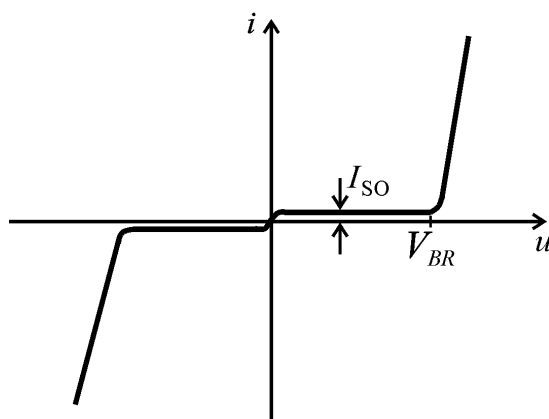
Rad tiristora je pouzdan na radnim naponima do $1200V$. Ako na sekundaru imamo $2kV$ tada je maksimalni radni napon $3kV$. Prilikom rada javljaju se prenaponi (50% radnog napona), pa dolazimo do napona od $4,5kV$. Uzimanjem u obzir i rezerve od 20 % dolazi se do napona 5 do $6kV$, što iziskuje vezivanje 4 tiristora na red. Problemi se javljaju i kod velikih strujnih opterećenja, pa se ovakve grane vežu paralelno (isprekidane linije na slici).



Slika br.13.6.2. Principijelna električna šema veze tiristora na red i u paralelu radi povećanja naponskog nivoa i strujnog kapaciteta prekidača

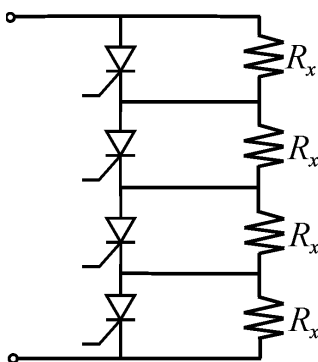
13.7 Prenaponska zaštita tiristora u tiristorskoj lokomotivi

Na slici je prikazana $u-i$ karakteristika tiristora na kojoj je sa I_{SO} označena struja "curenja", tj. struja kada tiristor nije uključen, koja kod ovih tiristora tipično iznosi oko $50mA$:



Slika br.13.7.1. Strujno naponska karakteristika tiristora

Ta struja nije ista kod svih tiristora, jer to tehnološki nije moguće izvesti, pa bi to kao posledicu imalo da, recimo, 4 redno vezana tiristora ne bi preuzimala po četvrtinu napona. Zato se zajedno sa njima vezuju otpornici R_x , kao što je prikazano na sledećoj slici:

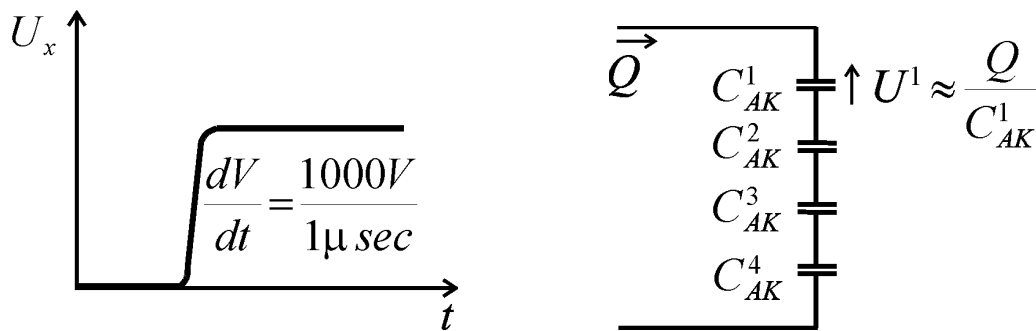


Slika br.13.7.2. Paralelno sa tiristorima se vezuju otpori kako bi se obezbedila jednaka raspodela napona

Pri tome otpornici R_x moraju da budu takvi da je zadovoljen uslov:

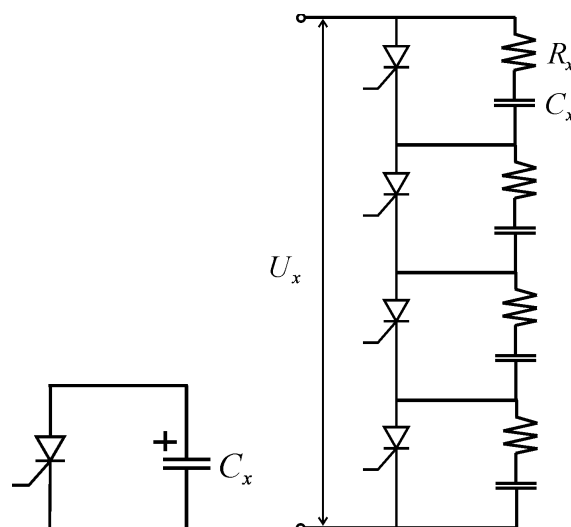
$$I_{Rx} \approx 5 \cdot I_{S0} \quad (12.7.1)$$

Ovakva veza tiristora u toku komutacije biva izložena velikim i brzim promenama napona, kao što je prikazano na narednoj slici:



Slika br.13.7.3. Zbog velike strmine napona pri komutaciji dolaze do izražaja parazitivne kapacitvnosti

U tom kratkom vremenskom intervalu parazitne kapacitivnosti (C_{AK}) tiristora prihvataju neko naelektrisanje Q . Ove parazitne kapacitivnosti su male (1,5 do 10nF), nepoželjne su i mogu se bitno razlikovati od tiristora do tiristora, što uslovljava da raspodela napona na tiristorima bude loša. Zato se stavlja $C_x \sim 5C_{AK}$ da na sebe preuzme većinu naelektrisanja, tj. da zaštiti tiristor, kao što je prikazano na narednoj slici:



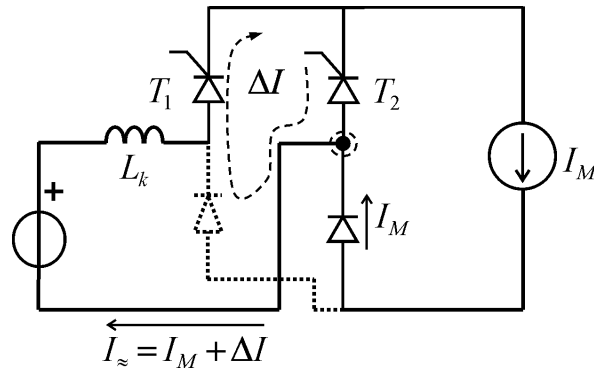
Slika br.13.7.4. Paralelno sa tiristorima se vezuju i kondenzatori kako bi se obezbedila jednaka raspodela napona (odnosno da bi se tiristor zastitio)

Ovde se postavlja pitanje zašto je R_x i C_x vezano redno? Tiristor ima veliku površinu. Ekvivalentno gledano može se reći da je sastavljen iz mnogo malih tiristora vezanih paralelno. Potrebno je da se svi ti "mali tiristori" uključe zajedno. U slučaju kad bi bio vezan samo C_x (kao na gornjoj slici), a pri tom se desi da se jedan od "malih tiristora" prvi uključi, sva struja iz C_x bi otišla u njega i uništila bi ga (samim tim bi i ceo tiristor bio neupotrebljiv). Da bi se smanjila ova udarna struja, u početku rada se stavlja R_x na red sa C_x i to takav da je:

$$R_x \approx \frac{U_{C_x}^0}{3 \div 5 \cdot I_{tiristora}^{nom}} \quad (12.7.2)$$

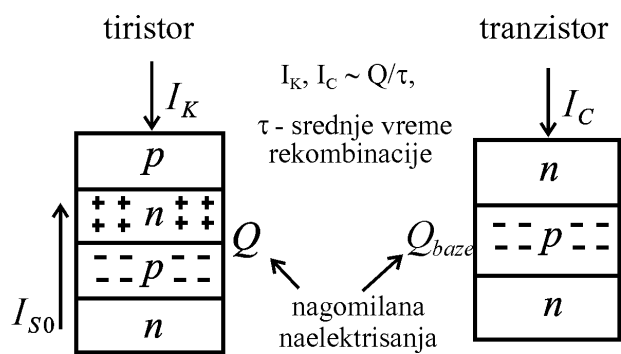
Pored ovoga, prilikom izrade tiristora, u njemu se pravi mrežasta struktura, da bi se na taj način maksimalno smanjilo nesimetrično uključivanje "malih tiristora".

Druga funkcija RC zaštite je umanjeње komutacionih prenapona:

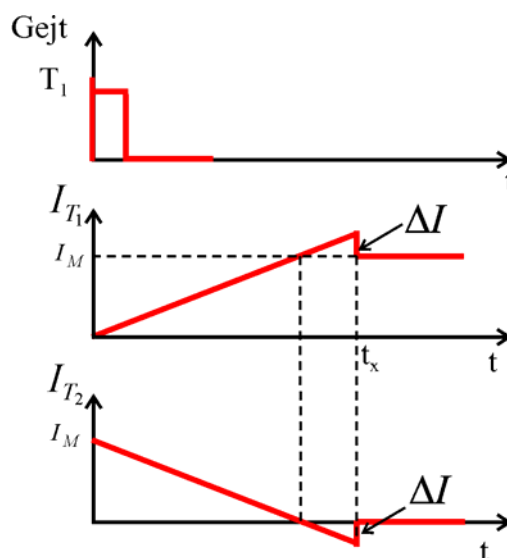


Slika br.13.7.5. U kratkotrajnom intervalu komutacije vode oba tiristora (onaj koji se pali i onaj koji se gasi)

Pretpostavimo da je vodio T_2 i da želimo da uključimo T_1 . Nakon dovođenja impulsa na gejt T_1 , on će provesti, ali će prethodno neko vreme ipak voditi oba tiristora (proces komutacije). Da bi se eliminisala nagomilana naelektrisanja mora kroz T_2 neko vreme da protiče inverzna struja (ta struja je na gornjem kolu prikazana isprekidanim linijama):



Slika br.13.7.6. Oblasti P i N kod tiristora i tranzistora



Slika br.13.7.7. Vremenski oblici impulsa na gejt i struja tiristora

Posmatrajmo sada zaokruženi čvor: ka njemu preko diode ide struja I_M , a iz njega ka izvoru $I_c = I_M + \Delta I$, iz čega zaključujemo da postoji debalans od ΔI u tom čvoru. Taj debalans završava u parazitnoj kapacitivnosti tiristora T_2 :

$$\left. \frac{dU_{AK}^{T_2}}{dt} \right|_{t_x} = \frac{\Delta I}{C'_{AK}} \quad (12.7.3)$$

pa je prenapon koji se javlja na tiristoru definisan sa:

$$\frac{1}{2}L_K \cdot \Delta I^2 \cong \frac{1}{2}C'_{AK} \cdot U_{\text{prenapon}}^2 \quad (12.7.4)$$

pa ako je C'_{AK} manje, prenapon na tiristoru je veći. Zato se stavlja zaštita u vidu R_x i C_x .

13.8 Mašine za naizmeničnu struje (MNS)

U električnoj vuči se od MNS koriste trofazni asinhroni motori sa kratko spojenim (kavezom) rotorom kao i trofazni sinhroni motori sa permanentnim magnetima na rotoru. Kod vučnih pogona velike snage, u upotrebi su i sinhroni motori sa pobudnim namotajem na rotoru. Električna vozila ne poseduju trofazne izvore napona. Primarni izvori su često traktione baterije, koje daju jednosmerni napon, ili se pak radi o naizmeničnom, monofaznom naponu koji se u vozilo dovodi putem kontaktnog voda ili na neki drugi način. Stoga je neophodno obezbediti vučni pretvarač na čije priključke se dovodi jedan od pomenutih načina napajanja, a koji na svojim izlazima nudi simetričan trofazni, regulisan napon promenljive f .

Mašine naizmenične struje imaju prednosti u odnosu na mašine jednosmerne struje. Jedna od prednosti MNS je odsustvo četkica i kolektora, koji inače predstavljaju najveće ograničenje i nedostatak vučnih motora jednosmerne struje, i svih problema koji usled njih nastaju. Karakterišu ih manje dimenzije, manja masa, prema tome i niža cena. Srednja specifična cena asinhronog motora u “Sever” fabrici motora u Subotici, izražena u $[\$/kg]$ iznosi 7 do 8 američkih dolara.

Poznato je iz teorije električnih mašina da je ugaona brzina obrtanja rotora asinhronog motora manja od sinhrona zbog klizanja (s), pa zbog toga u narednom izrazu stavljamo znak “ $\approx$ ”:

Napon napajanja je približno jednak naponu u grani magnetizacije:

$$U_n \approx U_m \quad (12.8.4)$$

Izraz za fluks je:

$$\phi = \int U_m dt \quad (12.8.5)$$

Fluks je konstantan pa je

$$\frac{U}{f} = \text{const} . \quad (12.8.6)$$

Objasnimo sada zašto je potrebno držati fluks konstantnim i na kojoj vrednosti. Krenimo od Faradejevog zakona, koji se može iskazati u sledećoj formi

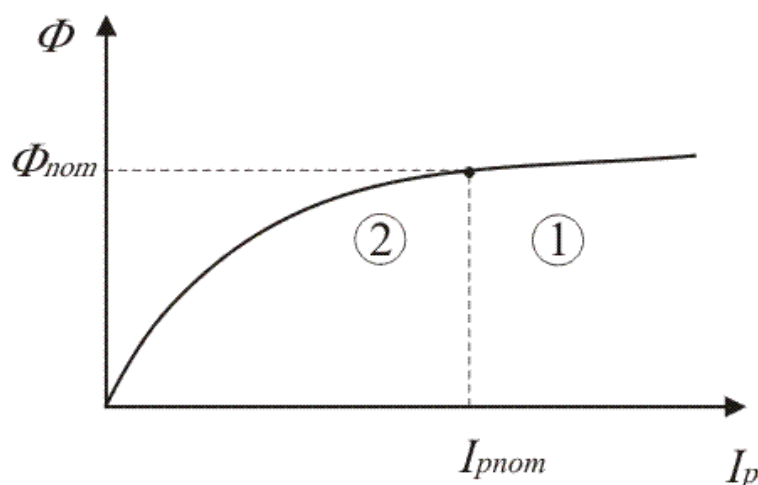
$$e = -\frac{\partial \psi}{\partial t} . \quad (12.8.7)$$

Pretpostavimo da je fluks, koji je stvoren strujom u pobudnim namotajima, prostoperiodična veremenski zavisna funkcija (npr. sinusna). Pretpostavka ne umanjuje opštos analize, već je čini lakšom za razumevanje. Transformacijom

$$\begin{aligned} e(t) &= -\psi_m 2\pi f \cos(2\pi ft) \rightarrow \\ \rightarrow e_m &= -\psi_m 2\pi f = -2\pi N \phi_m f \end{aligned} \quad (12.8.8)$$

dolazimo do upotrebljivog oblika zavisnosti između napona, fluksa i frekvencije.

Potreba, odnosno više ograničavajući faktor da vrednost fluksa bude konstantna ogleda se u karakteristici magnetnog materijala mašine – karakteristici magnećenja koja je data na slici.



Slika br.13.8.2. Karakteristika magnećenja

Najveća vrednost indukcije koja se može ostvariti a da pri tome struje ne budu prevelike zbog izražene nelinearnosti jeste B_m , je ustvari najpoželjnija. Time smo uspeli da smanjimo struje potrebne za razvijanje korisnog momenta, ostvarujemo dobro iskorišćenje magnetnog materijala u mašini... Ako bi vredost B_m smanjili nedovoljno koristimo magnetno kolo pa cena motora raste, dok za neke veće vrednosti magnetne indukcije su nam potrebne prevelike (nerealne) struje. Odatle proističe potreba da se fluks drži konstantnim i to baš na kolenu karakteristike magnećenja. Kako važi

$$e_m = -2\pi N \phi_m f = k \phi_m f, \quad (12.8.9)$$

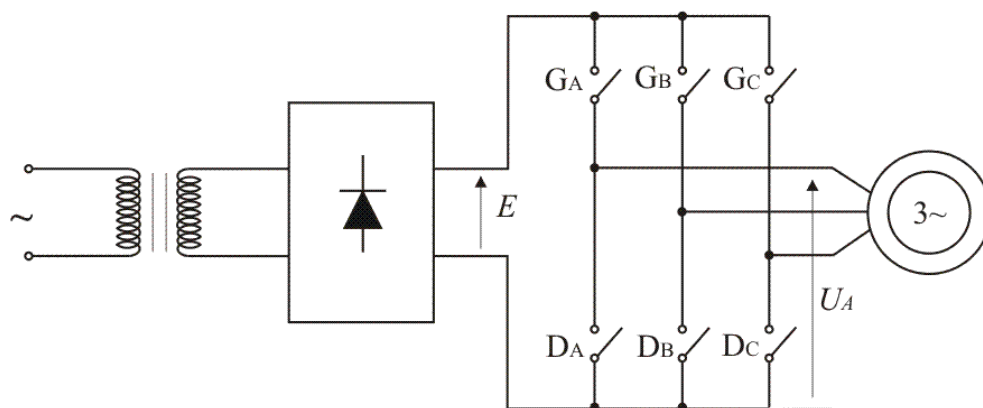
nije teško uvideti da promenu napona takođe mora pratiti i promena frekvencije kako bi fluks bio konstantan. Prema tome, pored promene učestanosti, mora se menjati i napon.

Da bi se ostvarila varijabilnost napona i frekvencije mora da postoji energetski konvertor, od koga se zahteva da bude mali i lagan, da se malo greje (da ima male gubitke snage), prema tome da je pogodan za ugradnju u vozilo. Na ulazu u energetski konvertor je napon kontaktnog voda (ili napojne šine).



Slika br.13.8.3. Principijelna šema energetskog konvertora sa varijabilnim naponom i frekvencijom

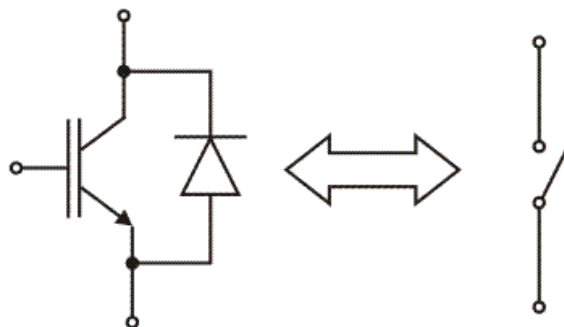
Često je u upotrebi Trofazni Tranzistorski Vučni Pretvarač (TTVP) - inverter, čija je principna šema prikazana na slici:



Slika br.13.8.4. Principijelna električna šema napajanja motora iz TTVP-a

Napon jednosmernog kola E retko prelazi vrednost od 1200V. Svaki prikazani idealni prekidač predstavlja:

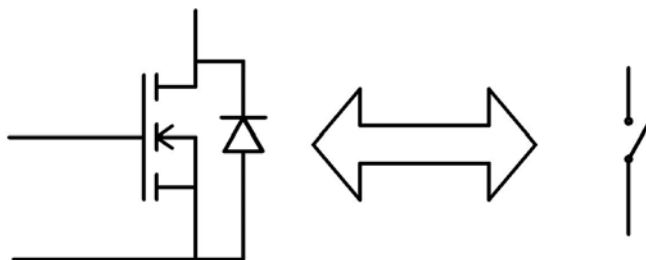
- sledeću vezu IGBT tranzistora i diode. Koristi se za napone napajanja E veće od 200V:



Slika br.13.8.5. Simbol IGBT tranzistora sa antiparalelno vezanom diodom

Razlog tome je pad napona na IGBT tranzistoru koji u provodnom stanju iznosi od 1.5V do 2.5V. Ako bi napon E bio manji od 200V pad napona na prekidačima ne bi bio zanemarljiv.

- sledeću vezu MOSFET tranzistora i diode. Koristi se za napone napajanja E manje od 200V:



Slika br.13.8.6. Simbol MOSFET tranzistora sa antiparalelno vezanom diodom

Razlog tome je pad napona na MOSFET tranzistoru. Može se pokazati da se u provodnom stanju MOSFET dosta dobro ekvivalentira otporom, koji u provodnom stanju iznosi oko 1mΩ. Otpornost proticanju struje kod ovog prekidača je zavisna od naponskog nivoa i može se aproksimirati kao

$$R \sim U^{2,5} \quad (12.8.10)$$

odakle se vidi da pri velikim naponima, otpornost proticanju struje, odnosno pad napona na ovom elementu dosta veliki pa se njegova upotreba ograničava najčešće na vučne pogone koji se napajaju iz trakcionih baterija čiji napon ne prevazilazi 200V.

Vučni pretvarač mora da ima kontinualno promenljiv i napon i učestanost. Bipolarni tranzistori u funkciji prekidača mogu da rade pri komutacionoj učestanosti do nekoliko kHz . Za više frekvencije umesto IGBT može se upotrebiti i MOSFET.

Primenjuje se impulsno širinska modulacija (IŠM) zato što napon U_a može uzimati vrednosti 0 ili E .

Perioda impulsno širinske modulacije T , koja je reda $100\mu s$, mora biti mnogo manja od vremenske konstante statora (bar za red veličine):

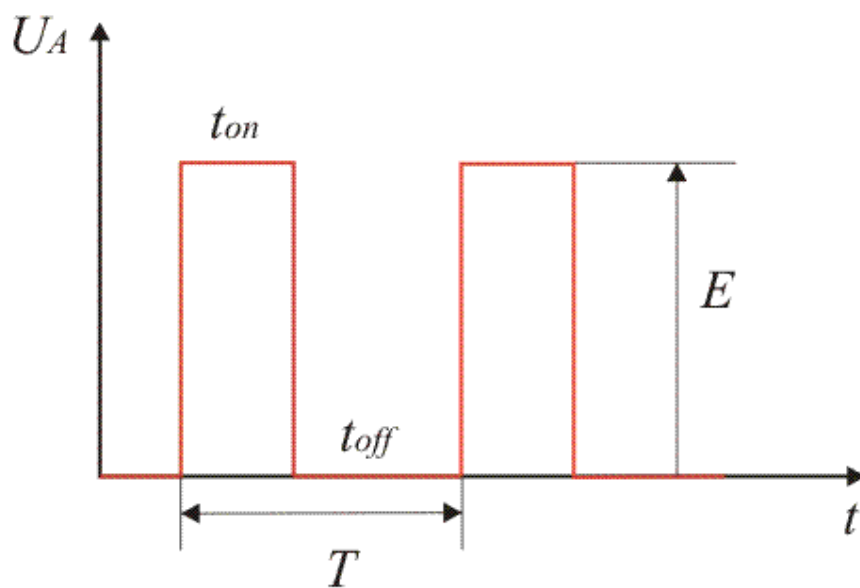
$$T \ll \tau_s = \frac{L_{\gamma s}}{R_s} \quad (12.8.11)$$

$L_{\gamma s}$ je induktivnost rasipanja statora.

ZAŠTO: Kako je priroda napona na izlazu iz TTVP –a impulsna (može uzimati vrednosti ili 0 ili E) relativno velika induktivnost rasipanja nam usporava promenu struje i omogućava da na ovaj način simuliramo sinusne (ili bilo kakve druge) talasne oblike struja sa brzinom uključivanja prekidača i njegovom dužinom uključenosti. Napomenimo da u teorijskom slučaju kada bi vremenska konstanta težila 0 ovakvim tipom upravljanja se ne bi mogao dobiti prostoperiodični oblik struje.

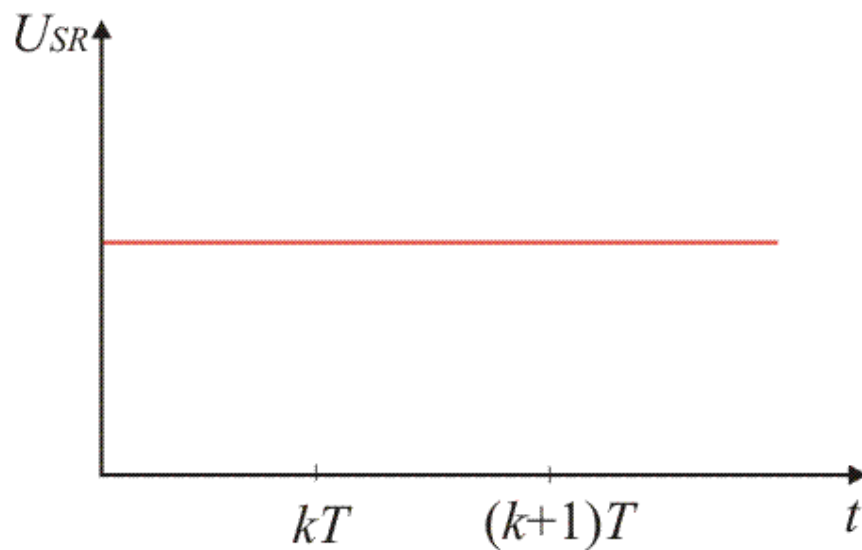
Na pobudu učestanosti $f=1/T$ motor neće reagovati.

Vreme u kome je prekidač G_A zatvoren, odnosno kada je tranzistor provodan, označava se sa t_{on} . Tada je prekidač D_A otvoren, odnosno taj tranzistor je neprovodan. Preostalo vreme do kraja periode, za koje je prekidač G_A otvoren, a D_A zatvoren, označava se sa t_{off} . Talasni oblik napona na izlazu, imajući u vidu navedeno vreme uključenja i isključenja tranzistora, biće kao na slici:



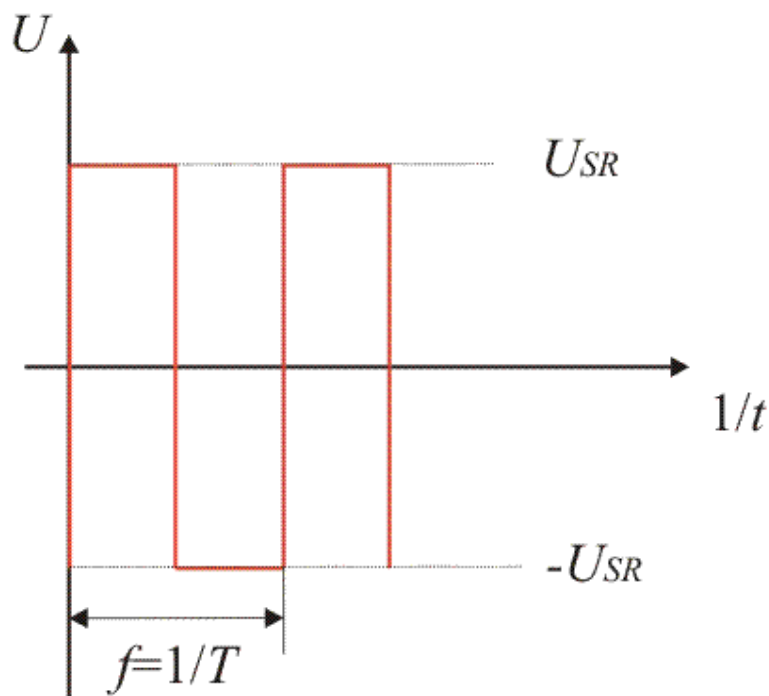
Slika br.13.8.7. Vremenski oblik periode napona na prekidaču

Ovaj talasni oblik napona se može razložiti na srednju vrednost:



Slika br.13.8.8. Impulsni oblik napona ima svoju srednju vrednost

i naizmeničnu komponentu:



Slika br.13.8.9. Impulsni oblik napona ima i svoju naizmeničnu komponentu

Srednja vrednost napona po definiciji je

$$U_{sr} = \frac{1}{T} \int_0^T U_a(t) dt . \quad (12.8.12)$$

Kako je reč o impulsnom obliku napona tada srednja vrednost napona postaje

$$U_{sr} = \frac{1}{T} \int_0^T U_a(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{t_{on}} E dt - \frac{1}{T} \int_{t_{on}}^{T-t_{on}} 0 dt = \frac{t_{on}}{T} E \quad (12.8.13)$$

Srednja vrednost napona je linearna funkcija vremena uključenosti prekidača t_{on} . Neka je t_{on} npr. prostoperiodična funkcija vremena, to znači da će i srednja vrednost napona postati takođe prostoperiodična funkcija vremena. Ovaj zaključak je veoma bitan jer mi (odnosno mikroprocesor koji mi programiramo) upravljamo dužinom vremena t_{on} što nam dalje omogućnost da na izlazu dobijemo razne oblike napona pa i simetričan sistem liniskih napon.

Učestanost naizmenične komponente je $f=1/T$, i ova komponenta se može zanemariti zbog toga što je perioda mnogo manja od vremenske konstante statora. Praktično se ima da se motor napaja samo sa U_{sr} .

Vreme t_{on} se može menjati, odnosno može se definisati kao:

$$t_{on(i)} = t_{on}(t) \quad (12.8.14)$$

Sledi za srednju vrednost napona:

$$U_{sr} \cong \frac{t_{on}(t)}{T} E \quad (12.8.15)$$

Za svaku fazu ima se:

$$t_{on(i)}^{Afaza} = \frac{T}{2} + \frac{T}{2} A \cos(2\pi f_s i T) \quad (12.8.16)$$

$$t_{on(i)}^{Bfaza} = \frac{T}{2} + \frac{T}{2} A \cos\left(2\pi f_s i T - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (12.8.17)$$

$$t_{on(i)}^{Cfaza} = \frac{T}{2} + \frac{T}{2} A \cos\left(2\pi f_s i T - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (12.8.18)$$

Za ovako definisana vremena dobiće se linijski naponi, uvažavajući činjenicu da motor “vidi” samo linijske napone u kojima **ne postoji** jednosmerna komponenta $E/2$.

$$U_{AB}^{sr}(t) \approx \frac{A}{2} E \sqrt{3} \cos\left(\omega_s t - \frac{\pi}{6}\right) \quad (12.8.19)$$

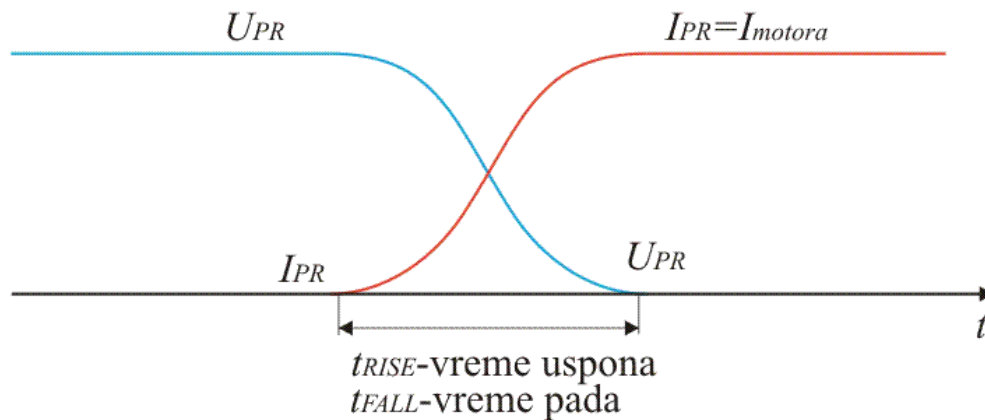
Na sličan način izgledaju i $U_{BC}^{sr}(t)$ i $U_{AC}^{sr}(t)$.

Za ovakvo upravljanje potreban je mikroprocesor. Znak “ $\approx$ ” stavlja se zbog zanemarenja visokofrekventne komponente, o čemu će biti reči. Sve mašine

naizmenične struje su, po zamenskoj šemi, niskofrekventni filtri. Komutovanje prekidača, učestanošću $f=1/T$, mora da bude za red veličine veće od učestanosti koja definiše dinamiku motora. U praksi se učestanost komutacije kreće od $1kHz$ do $10kHz$.

Izbor ove frekvencije bitno utiče na rad vučnog motora (npr. na grejanje). Postavlja se nekoliko zahteva koji determinišu vrednost komutacione učestanosti.

- Kao prvo razmotriće se uticaj veličine ove učestanosti na gubitke snage usled komutacije (**gašenje jednog i paljenje drugog prekidača**). Na slici je grafik vremenske promene napona na prekidaču i struje kroz prekidač, u toku komutacije. Vreme uspona t_{RISE} i vreme pada t_{FALL} je manje od $1\mu s$.



Slika br.13.8.10. Vremenski oblici napona i struje prekidača pri komutaciji

Energija izgubljena na prekidaču usled komutacije je:

$$W_C = \int_0^{t_{FALL}} u i dt \sim UI \frac{t_{FALL}}{2} \quad (12.8.20)$$

Iz ovoga sledi vrednost snage gubitaka:

$$P_C = W_C \cdot f \quad (12.8.21)$$

Vidi se da ako raste f , raste i broj komutacija prekidača u nekom vremenskom intervalu pa neminovno rastu gubici snage usled komutacije P_C koji se pretvaraju u toplotu. Smanjenjem ove učestanosti se smanjuju i gubici pa otuda i težnja za smanjenjem učestanosti. Što se češće komutuje veća je snaga gubitaka što može da oteža odvođenje toplote sa poluprovodnika snage, koji se koriste u električnoj vuči. Jedan od najvećih problema je, svakako, odvođenje toplote.

- Radi smanjenja gubitaka usled komutacije prave se brži prekidači snage, sa kraćim vremenom uspona t_{RISE} i vremenom pada t_{FALL} . U praksi je strmina

$$\frac{dV}{dt} < 10 \frac{V}{ns} \quad (12.8.22)$$

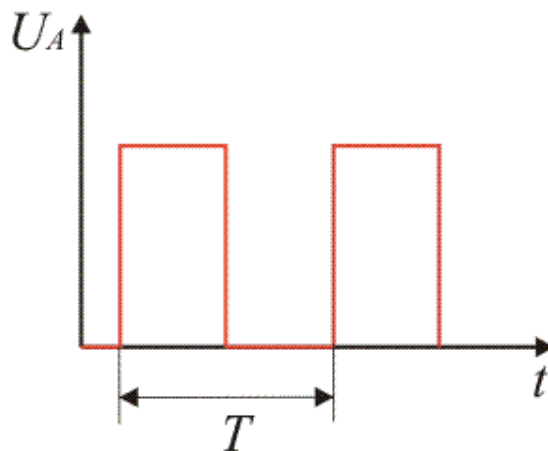
Praktično, promena napona za veoma kratko vreme dovodi do toga da napon nije više kvazistacionarna veličina, već elektromagnetni talas koji putuje .

radio talasi	dugi	3 – 30 km
	srednji	50 m – 3 km
	kratki	10 – 50 m
	ultra-kratki (UKT, FM)	10 cm – 10 m
mikrotalasi		0.3 mm – 10 cm
infracrveni (IC) zraci		760 nm – 0.3 mm
vidljiva svetlost		380 – 760 nm
ultravioletni (UV) zraci		10 – 380 nm
x zraci		10 pm – 10 nm
γ zraci		0.1 – 10 pm
sek. kosmički zraci		< 0.1 pm

Tabela podele em-talasa prema talasnoj dužini

Vučni pretvarači treba da zadovolje elektromagnetnu kompatibilnost, koja sa gornje strane ograničava učestanost komutacije. U sistemu ima puno informacija koje se prenose i koje se ne smeju “zagaditi” elektromagnetnim smetnjama, odnosno elektronski uređaji ne smeju jedan drugom ugrožavati rad.

Kada se posmatra napon U_A



Slika br.13.8.11. Vremenski oblik napona jedne faze

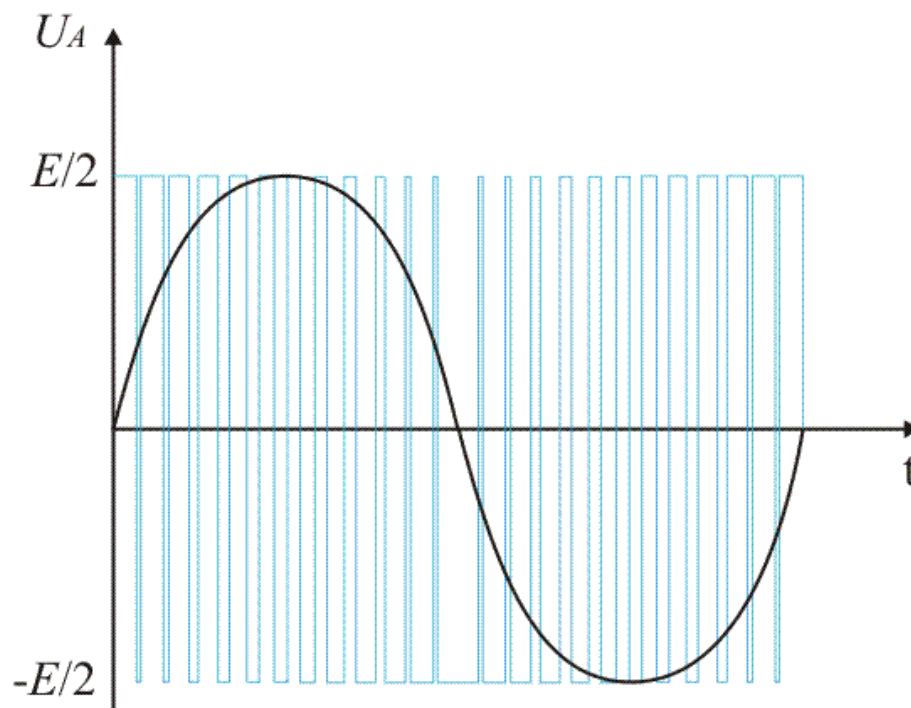
uočava se da on poseduje neparne harmonike čiji red seže do beskonačnosti, pri čemu im je amplituda :

$$A_{(2n+1)} = \frac{1}{2n+1} \quad (12.8.23)$$

Amplitude harmonika sporo opadaju. Pad je reda $1/n$. Ako je učestanost komutacije velika, samim tim i viši harmonici imaju veće amplitude pa mogu da u vidu smetnji izvrše uticaj na neku drugu informaciju, čak i u radio opsegu. Zbog toga se teži smanjenju učestanosti.

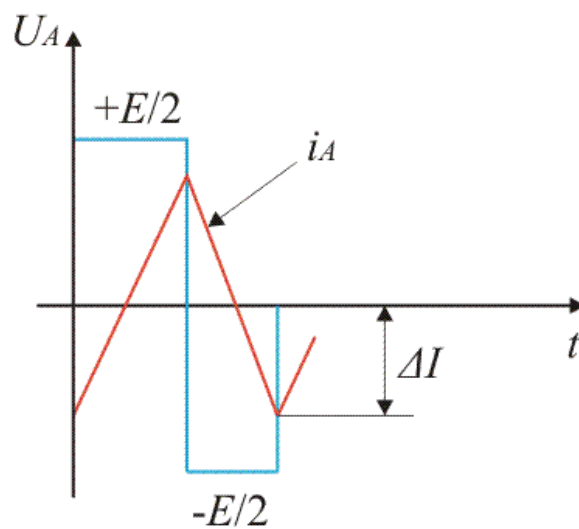
- U toku uspostavljanja naponske ivice, električno polje na spoju bakra i izolacije je nekoliko puta veće nego u stacionarnom stanju. Uspon traje nekoliko desetina μs , ali se ponavlja više hiljada puta u sekundi, i sve to mnogo dana u godini, tako da se događaju mikroproboji (parcijalni proboji), mikro mehurići koji se šire. To dovodi do starenja izolacije. Zbog toga se ne sme preterati sa brzinom rada prekidača, tj. sa učestanošću komutacije.
- Učestanost komutacije utiče na talasnost fazne struje motora (na njenu nesinusoidalnost, na njeno izobličenje).

Vremenski dijagram u_A realno izgleda kao na slici:



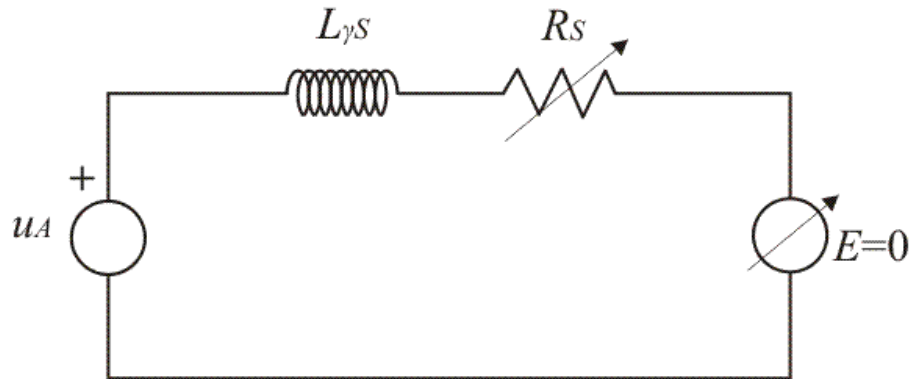
Slika br.13.8.12. Vremenski oblik napona jedne faze sa naglašenom srednjom vrednošću

Posmatrajmo primer u kome u_A izgleda kao na slici:



Slika br.13.8.13. Vremenski oblik napona i promene struje

Možemo uvesti jedno bitno uprošćenje: motor se aproksimira samo statorskom induktivnošću rasipanja, kao na slici:



Slika br.13.8.14. Principijelna električna šema motora

Izraz za struju je prost:

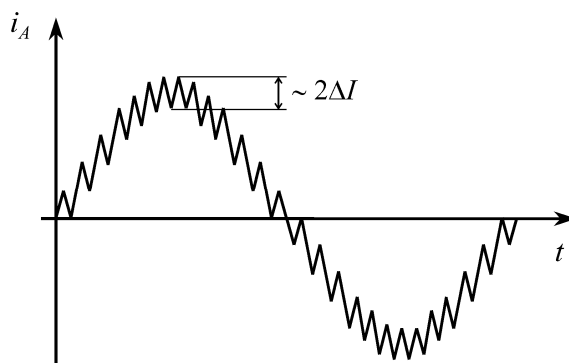
$$i_A = \frac{1}{L_{\gamma s}} \int u_A(t) dt \quad (12.8.24)$$

U ovom slučaju talasni oblik faze struje izgleda kao na prethodnom dijagramu. Talasnost struje u ovom slučaju je:

$$L_{\gamma s} 2\Delta I = E \frac{T}{2} \quad \rightarrow \quad \Delta I = \frac{ET}{4L_{\gamma s}} \sim \frac{1}{f \cdot L_{\gamma s}} \quad (12.8.25)$$

Uticanjem na induktivnost rasipanja statora i na učestanost komutacije može se smanjiti talasnost.

Realna struja motora, dakle, nije sinusna, izobličena je, i izgleda kao na slici:



Slika br.13.8.15. Vremenski oblik struje jedne faze sa naglašenim riplom struje

Struja ima visokofrekventnu komponentu amplitude $2\Delta I$.

Ova talasnost malo utiče na fluks i moment u motoru ali prouzrokuje gubitke snage u motoru, tj. utiče na zagrevanje. Usled skin efekta ova visokofrekventna komponenta struje nailazi na veći otpor u provodnicima. Taj efekat je veći kod rotora jer su kod statora provodnici tanki. Fluks rasipanja imaće isti oblik kao i ova visokofrekventna komponenta struje pa će prouzrokovati gubitke u gvožđu.

Zbog svega ovoga teži se da se smanji talasnost fazne struje motora ΔI , odnosno, da se poveća učestanost komutacije.

- Fluks rasipanja ima pulsacije. Na razdvojnoj površini dva materijala, jednog veće a drugog manje magnetne permeabilnosti, javljaju se sile. Ova pojava se zove **magnetostrikcija**. Ako su pulsacije sila na npr. $10kHz$, pojavljuju se vibracije limova, tj. zvuk frekvencije $10kHz$.

Zbog osetljivosti uha (subjektivne) koja je najveća od $300Hz$ do $1,5kHz$, frekvencije komutacije treba podići iznad $1,5kHz$. To znači da se teži da se poveća učestanost komutacije.

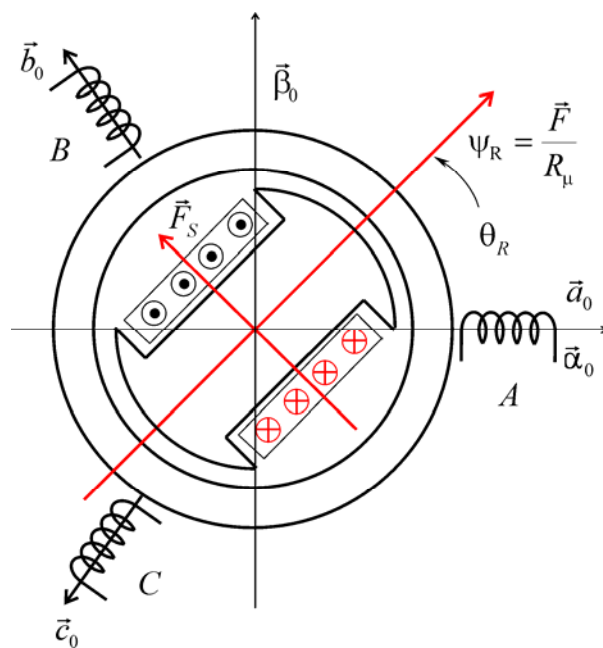
Sumirajući ovih nekoliko prethodnih razmatranja zaključuje se da je pri izboru povoljne komutacione učestanosti potrebno postići kompromis između nekoliko oprečnih zahteva.

13.8.a Izvođenje modela mašine za naizmeničnu struju

U električnoj vuči, od mašina za naizmeničnu struju, se najčešće koriste trofazni motori.

13.8.a.1 Modelovanje statora mašina za naizmeničnu struju

Trofazni namotaj predstavljen na slici br.13.8.16 je zajednička osobina stator bilo da se radi o asinhronom ili sinhronom motoru.



Slika br.13.8.16. Trofazni namotaj statora mašine za naizmeničnu struju

Pretpostavimo da su struje u namotima statora date sledećim jednačinama:

$$i_a = I_{\max} \cos \omega_s t \quad (12.8.26)$$

$$i_b = I_{\max} \cos(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}) \quad (12.8.27)$$

$$i_c = I_{\max} \cos(\omega_s t - \frac{4\pi}{3}) \quad (12.8.28)$$

i da je ort faze a postavljen tako da bude kolinearan sa osom alfa.

Sada ćemo trofazni namotaj statora da predstavimo dvofaznim. Jednostavnije je za sagledavanje, imamo jedan namotaj manje.

Uvedimo novi kordinatni sistem alfa–beta. Sada zamislimo namotaje čije se ose poklapaju sa osama alfa i beta. Ako na njih projektujemo MPS koje stvaraju fazni namotaji i fazne struje koje kroz njih teku, rezultatna MPS se može napisati kao:

$$\vec{F}_s = N_s \vec{\alpha}_0 (i_a - \frac{i_b}{2} - \frac{i_c}{2}) + N_s \vec{\beta}_0 (\sqrt{3} \frac{i_b}{2} - \sqrt{3} \frac{i_c}{2}) = N_s \vec{\alpha}_0 i_\alpha + N_s \vec{\beta}_0 i_\beta \quad (12.8.29)$$

pri čemu važi da je

$$i_\alpha = i_a - \frac{i_b}{2} - \frac{i_c}{2} \quad (12.8.30)$$

$$i_\beta = \sqrt{3} \frac{i_b}{2} - \sqrt{3} \frac{i_c}{2} \quad (12.8.31)$$

Kraće zapisano

$$\begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} = k \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} \quad (12.8.32)$$

ovo se naziva transformacija koordinatnog stanja. Koeficijent k se razlikuje u različitoj literaturi kod pojedinih autora. Njegovim izborom se utiče samo da li će transformacija biti invarijantna po parametima (otpori, induktivnosti), snazi ili nečem drugom.

Analogno strujama, transformacija se može primeniti i na napone i na flukseve.

$$\begin{pmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{pmatrix} = k \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{pmatrix} \quad (12.8.33)$$

$$\begin{pmatrix} \Psi_\alpha \\ \Psi_\beta \end{pmatrix} = k \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{pmatrix} \quad (12.8.34)$$

Ako se izabere vrednost parametra

$$k = \frac{2}{3} \quad (12.8.35)$$

transformacija postaje invarijantna po impedansi ali ne i po snazi . Sada važi

$$P_{abc} = \frac{3}{2} P_{\alpha\beta} \quad (12.8.36)$$

13.8.a.2 Modelovanje rotora mašina za naizmeničnu struju

Rotorske struje u rotorskom namotaju stvaraju neko obrtno polje bez obzora na tip mašine. Svako obrtno polje se može predstaviti (stvoriti) sa najmanje dva ortogonalno postavljena namotaja. Znači, rotor naizmenične mašine ćemo predstaviti kao dva virtuelna (zamišljena) namotaja koja stvaraju svojim zamišljenim strujama isti magnetno-električni uticaj, kao da posmatramo rotor naizmenične mašine. Činjenica da na rotoru sinhronne mašine postoji (ako postoji) jedan namotaj napajan jednosmernom strujom i da se kod rotora asinhronog motora ne mogu razlikovati

provodnici jedne faze od druge jer su svi kratkospojeni ne treba da nas zbuni. Model se kasnije može prilagoditi svakoj mašini ponaosob.

13.8.a.3 Model mašine za naizmeničnu struju

Naponske jednačine novih (virtuelnih) namotaja date su sledećim jednačinama

$$u_{\alpha s} = R_s i_{\alpha s} + \frac{\partial \Psi_{\alpha s}}{\partial t} \quad (12.8.37)$$

$$u_{\beta s} = R_s i_{\beta s} + \frac{\partial \Psi_{\beta s}}{\partial t} \quad (12.8.38)$$

$$u_{\alpha r} = R_r i_{\alpha r} + \frac{\partial \Psi_{\alpha r}}{\partial t} \quad (12.8.39)$$

$$u_{\beta r} = R_r i_{\beta r} + \frac{\partial \Psi_{\beta r}}{\partial t} \quad (12.8.40)$$

Potrebno je naći vezu između struja i flukseva. Ta veza po prirodi je induktivnost. U matricnoj formi se naziva matricom induktivnosti i ima sledeći izgled

$$\begin{pmatrix} \Psi_{\alpha s} \\ \Psi_{\beta s} \\ \Psi_{\alpha r} \\ \Psi_{\beta r} \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} L_s & 0 & L_m \cos \theta_r & -L_m \cos \theta_r \\ 0 & L_s & L_m \sin \theta_r & L_m \cos \theta_r \\ L_m \cos \theta_r & -L_m \sin \theta_r & L_r & 0 \\ -L_m \sin \theta_r & L_m \cos \theta_r & 0 & L_r \end{pmatrix}}_{\text{matrica induktivnosti}} \begin{pmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \\ i_{\alpha r} \\ i_{\beta r} \end{pmatrix} \quad (12.8.41)$$

gde je

L_s – induktivnost statorskog namotaja ($L_s = L_m + L_{\gamma s}$, gde je $L_{\gamma s}$ rasipna induktivnost statora)

L_r – induktivnost rotorskog namotaja ($L_r = L_m + L_{\gamma r}$, gde je $L_{\gamma r}$ rasipna induktivnost rotora)

L_m – međusobna induktivnost statorskog i rotorskog namotaja ($L_m = k^* \sqrt{L_s L_r}$)

θ_r – trenutni položaj rotora

Problem sa ovim modelom je matrica induktivnosti. Njeni članovi su vremenski promenljive funkcije pa nam komplikuju sistem jednačina. Ne treba pogrešno shvatiti. Ovaj model je u potpunosti tačan, ali mi ne možemo da zaključimo ništa iz takvog modela. Još jedan problem predstavljaju i stacionarna stanja. Promenljive stanja ovog sistema u stacionarnim stanjima nisu konstantne, tj. u ovakvom modelu nemamo stacionarna stanja.

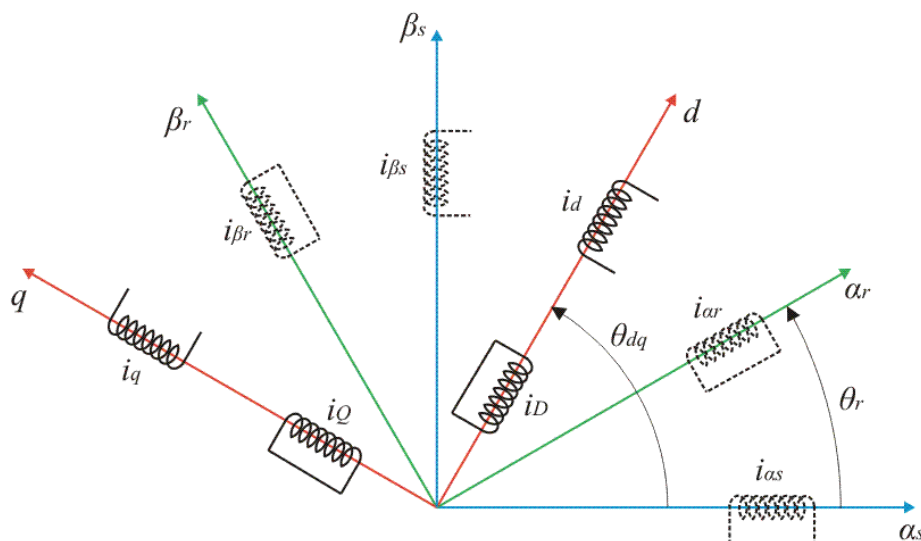
Primer komplikovanosti jednačina

$$u_{\alpha s} = R_s i_{\alpha s} + L_s \frac{\partial i_{\alpha s}}{\partial t} + L_m \cos \theta_r \frac{\partial i_{\alpha r}}{\partial t} - \omega_r L_m \sin \theta_r i_{\alpha r} - L_m \sin \theta_r \frac{\partial i_{\beta r}}{\partial t} - \omega_r L_m \cos \theta_r i_{\beta r} \quad (12.8.42)$$

13.8.a.4 Obrtna dq transformacija

Kako nam prethodni model mašine za naizmeničnu struju nije odgovarao zbog nepreglednosti i nepostojanja stacionarnih stanja (gde su promenljive stanja konstantne, tj. njihovi izvodi po vremenu su 0) moramo naći drugo rešenje.

Uvedimo nov koordinatni sistem sa d i q osom. Neka nov koordinatni sistem ima dva namotaja na d osi i dva namotaja na q osi, po jedan za predstavu statora i po jedan za predstavu rotora. Nov dq koordinatni sistem ne mora biti stacionaran, već može da rotira oko svog centra koji se poklapa sa centrom rotora. Na slici se najbolje vidi o čemu je reč.



Slika br.13.8.17. Ilustracija preslikavanja statorskih i rotorskih veličina na d i q ose (obrtne transformacije)

Sa malim slovima d i q, koji se odnose na namotaje i struje u njima, će se označavati statorske veličine, dok sa velikim slovima D i Q rotorske veličine. Svedimo (projektujemo) sada na dq ose struje iz alfa-beta koordinatnih sistema statora i rotora. U matričnoj formi predstavljena, transformacija izvršena na strujama ima sledeći oblik:

$$\begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_{dq} & \sin \theta_{dq} \\ -\sin \theta_{dq} & \cos \theta_{dq} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \end{pmatrix} \quad (12.8.43)$$

$$\begin{pmatrix} i_D \\ i_Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_k & \sin \theta_k \\ -\sin \theta_k & \cos \theta_k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{\alpha r} \\ i_{\beta r} \end{pmatrix} \quad (12.8.44)$$

što se naravno može primeniti i na ostale veličine.

Na fluks

$$\begin{pmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_{dq} & \sin \theta_{dq} \\ -\sin \theta_{dq} & \cos \theta_{dq} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Psi_{\alpha s} \\ \Psi_{\beta s} \end{pmatrix} \quad (12.8.45)$$

$$\begin{pmatrix} \Psi_D \\ \Psi_Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_k & \sin \theta_k \\ -\sin \theta_k & \cos \theta_k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Psi_{\alpha r} \\ \Psi_{\beta r} \end{pmatrix} \quad (12.8.46)$$

i na napon

$$\begin{pmatrix} u_d \\ u_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_{dq} & \sin \theta_{dq} \\ -\sin \theta_{dq} & \cos \theta_{dq} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_{\alpha s} \\ u_{\beta s} \end{pmatrix} \quad (12.8.47)$$

$$\begin{pmatrix} u_D \\ u_Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_k & \sin \theta_k \\ -\sin \theta_k & \cos \theta_k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_{\alpha r} \\ u_{\beta r} \end{pmatrix}. \quad (12.8.48)$$

Položaj dq koordinatnog sistema u odnosu na statorski je određen sa

$$\theta_{dg} = \theta_0 + \int \omega_{dq} dt \quad (12.8.49)$$

gde je

ω_{dq} - brzina obrtanja dq sistema u odnosu na stator.

Inače, θ_k je ugao klizanja i računa se kao

$$\theta_k = \theta_{dg} - \theta_r \quad (12.8.50)$$

gde je θ_r predstavlja ugao položaja rotorskog koordinatnog sistema, odnosno rotora.

Ova transformacija koordinatnog sistema se naziva obrtna transformacija ili Parkova transformacija.

Napišimo sada novu matricu induktivnosti. Jedan od glavnih razloga uvođenja dq sistema jeste vremenska promenljivost članova prvobitne matrice induktivnosti. Probajmo to da izbegnemo. Članovi matrice induktivnosti će biti konstantni samo ako se naš novi dq koordinatni sistem bude obrtao brzinom obrtnog polja, odnosno sinhronom brzinom

$$\omega_{dq} = \omega_s . \quad (12.8.51)$$

Matrica induktivnosti sada izgleda

$$\begin{pmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \\ \Psi_D \\ \Psi_Q \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{pmatrix}}_{\text{matrica induktivnosti}} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \\ i_D \\ i_Q \end{pmatrix} \quad (12.8.52)$$

što nam je i bio cilj.

Znači, kompletna transformacija, da bi se iz abc domena prebacili u dq koordinatni sistem potrebno je uraditi sledeće transformacije

$$\begin{pmatrix} u_d \\ u_q \end{pmatrix} = \underbrace{\frac{2}{3} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix}}_{\text{Klarkova}} \overbrace{\begin{pmatrix} \cos \theta_{dq} & \sin \theta_{dq} \\ -\sin \theta_{dq} & \cos \theta_{dq} \end{pmatrix}}^{\text{Blondelova transformacija}} \underbrace{\begin{pmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{pmatrix}}_{\text{Parkova}} \quad (12.8.53)$$

Kompletnan model mašine za naizmeničnu struju ima sledeći oblik

$$u_d = R_s i_d + \frac{\partial \Psi_d}{\partial t} - \omega_{dq} \Psi_q \quad (12.8.54)$$

$$u_q = R_s i_q + \frac{\partial \Psi_q}{\partial t} + \omega_{dq} \Psi_d \quad (12.8.55)$$

$$u_D = R_r i_D + \frac{\partial \Psi_D}{\partial t} - \omega_k \Psi_Q \quad (12.8.56)$$

$$u_Q = R_r i_Q + \frac{\partial \Psi_Q}{\partial t} + \omega_k \Psi_D \quad (12.8.57)$$

$$J \frac{\partial \omega_r}{\partial t} = M_{em} - \Sigma M_{otp} \quad (12.8.58)$$

$$\begin{pmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \\ \Psi_D \\ \Psi_Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \\ i_D \\ i_Q \end{pmatrix} \quad (12.8.59)$$

$$M_{em} = \frac{3p}{2} (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d) \quad (12.8.60)$$

Osvrnimo se na pojedine jednačine koje nisu razmatrane u prethodnom tekstu. Jednačina br. (11.2.58) predstavlja Njutnovu jednačinu sume momenata. Ona opisuje kako mehaničku dinamiku mašina tako i njihovu statiku. Jednačina br.(11.2.60) predstavlja izraz za elektromagnetni momenat koji je izražen preko veličina u dq sistemu. Do ovakvog izgleda izraza za momenat se dolazi na sledeći način:

Izraz za momenat je

$$M_{em} = \frac{P_{ob}}{\omega_{syn}} = p \frac{P_{ob}}{\omega_s} \quad (12.8.61)$$

gde

P_{ob} - predstavlja snagu koju stator predaje rotoru (obrotna snaga ili snaga polja)

p - broj polova mašine.

Celokupnu snagu koju motor uzima (P_{in}), kada predstavimo preko veličina u dq sistemu, izgleda kao

$$P_{in} = P_{abc} = \frac{3}{2}(u_d i_d + u_q i_q) = \underbrace{\frac{3}{2}R_s(i_d^2 + i_q^2)}_{P_{cu}} + \underbrace{\frac{3}{2}\left(i_d \frac{d\Psi_d}{dt} - i_q \frac{d\Psi_q}{dt}\right)}_{\text{izvor energije polja}} + \underbrace{\frac{3}{2}(\Psi_d i_q - \Psi_q i_d)\omega_s}_{P_{ob}} \quad (12.8.62)$$

Ubacivanjem izraza za P_{ob} u izraz za momenat (11.2.61) se dobija jednačina br. (11.2.60).

13.8.b Sinhroni vučni motor

Kao i svaka električna mašina, sinhroni motor je reverzibilan (može da radi u motornom i u generatorskom režimu). Sinhrona mašina je jedina mašina koja može da proizvodi ili apsorbuje samo reaktivnu energiju, tj. da radi kao sinhroni kompenzator što je čini dragocenom u elektroenergetskom sistemu.

Dobre karakteristike sinhronih motora su sledeće:

- mogućnost ugrađivanja velikih snaga i širok dijapazon oblasti konstantne snage motora,
- lako održavanje,
- lak prelaz iz motornog u generatorski rad što omogućuje električno kočenje,
- jednostavnost invertora za napajanje sinhronog motora,

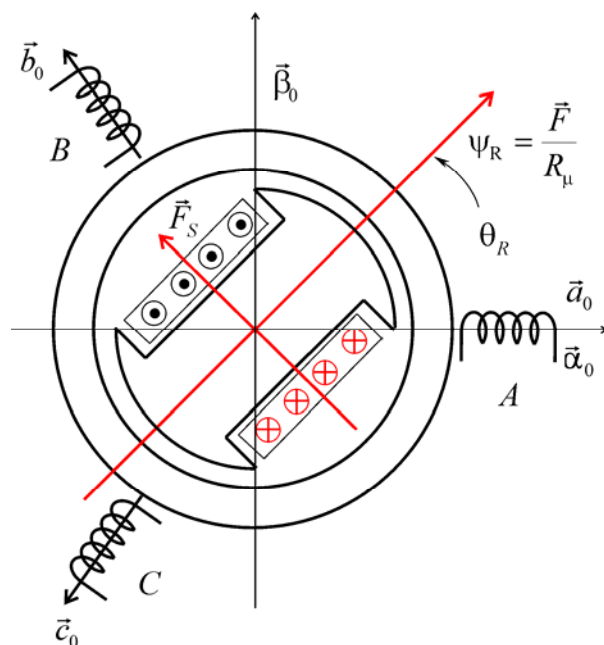
- dobar stepen iskorišćenja stoga što u rotoru SM nema gubitaka niti u gvožđu (jer nema relativnog pomicanja polja u odnosu na rotor) a nema ni gubitaka u bakru, jer nema bakra (kod rotora sa permanentnim magnetima)

Magnetno kolo sinhronne mašine se sastoji iz dva dela, nepokretnog - statora (koji predstavlja indukat i napaja se iz strujnog invertora) i pokretnog - rotora (koji predstavlja induktor i napaja se jednosmernom strujom iz pomoćnog izvora u slučaju da se pobudno polje obezbeđuje pobudnim namotajem.).

Princip rada sinhronog motora (SM) je sledeći:

Kroz provodnike rotora teče jednosmerna struja koja ima takav smer da je jedan pol severni, sledeći južni, itd. Usled proticanja ove struje javlja se stalno magnetno polje. Kada se rotor obrće on za sobom nosi i svoje polje, tj. nastaje obrtno magnetno polje. Obrtno polje preseca provodnike statora i indukuje u njima elektromotorne sile. Kako su namoti statora izvedeni prema pravilu o izvođenju trofaznog namota, tj. prostorno su pomenreni za $2\pi/3$, to su i elektromotorne sile indukovane u ovim namotima prostorno pomerene za $2\pi/3$, ili vremenski, za $1/3$ periode.

Poprečni presek na kome se vide namotaji statora, namotaj rotora, dvopolne sinhronne mašine, i njihova polja je dat na slici br.13.8.19.



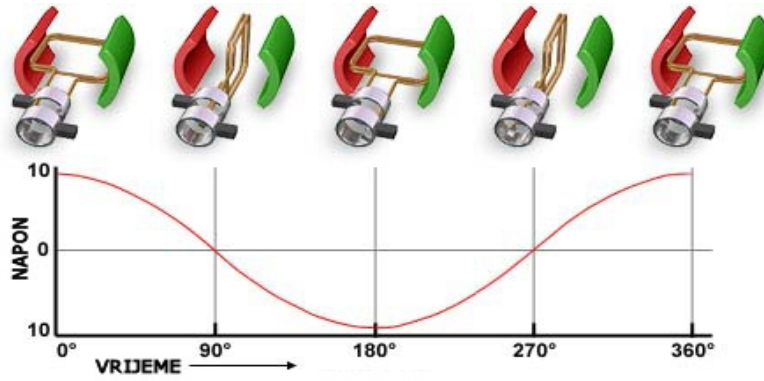
Slika br.13.8.18. Poprečni presek dvopolne sinhronne mašine na kome se vide namotaji statora, namotaji rotora, i njihova polja

F_s - predstavlja zbirnu magnetno pobudnu silu sva tri namotaja statora,
 ψ_R - predstavlja fluks koji potiče od pobudnog (rotorskog) namotaja
 R_μ - magnetni otpor vazdušnog zazora

Digresija



Slika br.13.8.19.(a) Pravilo desne i leve ruke je ilustrovano na sledećim slikama, dok je indukovane EMS usled relativnog kretanja provodnika u odnosu na polje ilustrovano na sledećoj slici



Slika br.13.8.19.(b)

Struje u namotima statora date su sledećim jednačinama:

$$i_a = I_{\max} \cos \omega_s t \quad (12.8.63)$$

$$i_b = I_{\max} \cos(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}) \quad (12.8.64)$$

$$i_c = I_{\max} \cos(\omega_s t - \frac{4\pi}{3}) \quad (12.8.65)$$

gde je ω_s ugaona brzina rotora.

Magnetopobudna sila statora jeste **vektorski zbir pojedinih MPS faznih namota**:

$$\vec{F}_s = N_s (\vec{a}_0 i_a + \vec{b}_0 i_b + \vec{c}_0 i_c) \quad (12.8.66)$$

gde su sa $\vec{a}_0, \vec{b}_0, \vec{c}_0$ označeni ortovi pojedinačnih faza respektivno.

Kada se navedeni izrazi za struje uvrste u izraz za MPS statora dobija se:

$$\vec{F}_s = \frac{3}{2} N_s I_{\max} (\vec{\alpha}_0 \cos \omega_s t + \vec{\beta}_0 \sin \omega_s t) \quad (12.8.67)$$

Ugao između MPS statora F_s i fluksa rotora je:

$$\xi = \angle(\vec{F}_S, \vec{\psi}_R) \quad (12.8.68)$$

Ugao između fluksa rotora i jediničnog vektora a - ose je:

$$\theta_R = \angle(\vec{\psi}_R, \vec{a}_0) \quad (12.8.69)$$

Vektor elektromagnetnog momenta se računa na sledeći način:

$$\vec{M}_{em} = \vec{F}_S \times \vec{\psi}_R \quad (12.8.70)$$

Njegov moduo je:

$$|\vec{M}_{em}| = F_S \cdot \psi_R \cdot \sin \xi \quad (12.8.71)$$

Uslovi za regulisanje momenta M_{em} :

- Poznat položaj rotora (merenje θ_R)

- Posedovati kontrolu i_a, i_b, i_c

Struje i_a, i_b, i_c je potrebno injektovati tako da je:

$$\xi = \angle(\vec{F}_S, \vec{\psi}_R) = \frac{\pi}{2} \quad (12.8.72)$$

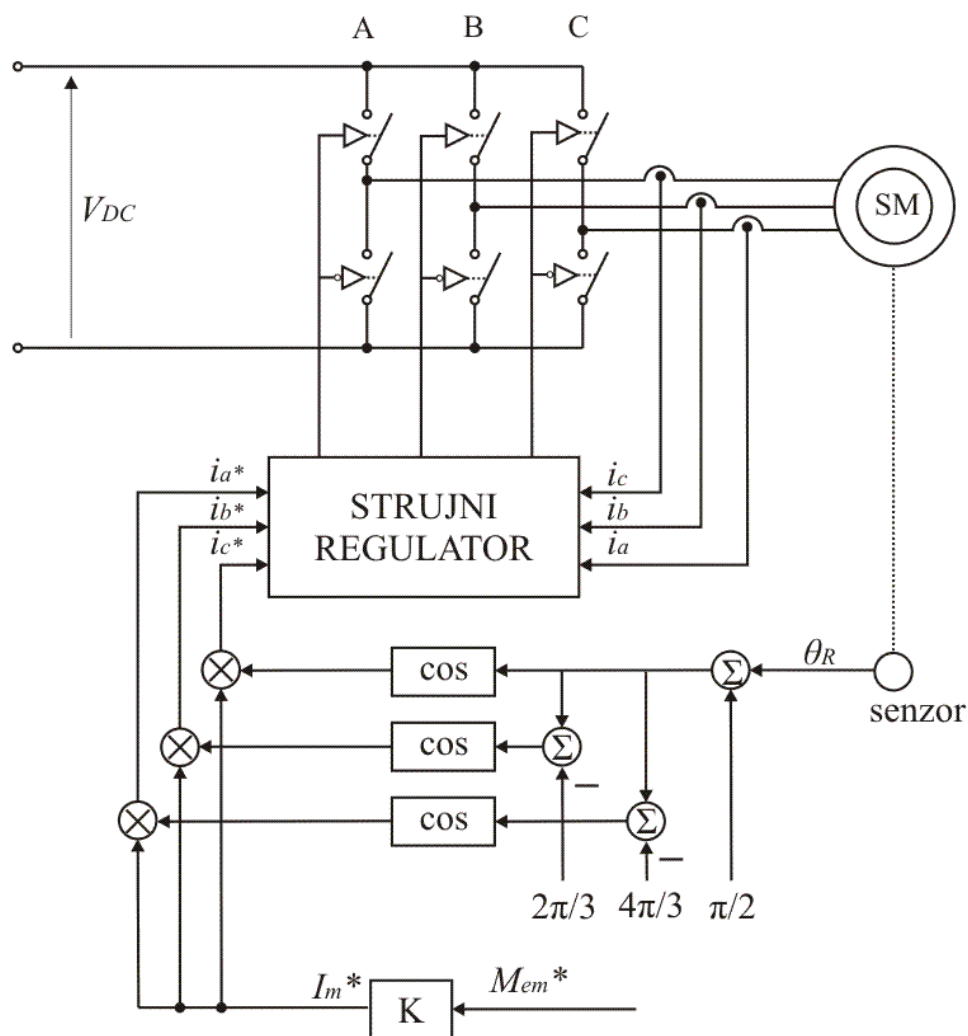
jer na taj način dobijamo najveći moment za neku struju.

To znači da se ugao između vektora struja i fluksa podešava tako da on bude optimalan. Kako smo ugao ξ postavili na konstantnu vrednost, dalje sledi da je momenat :

$$M_{em} = \left| \vec{F}_S \right| \cdot \left| \vec{\psi}_R \right| \quad (12.8.73)$$

Ako se podsetimo kako se računao momenat kod motora JS, uviđamo da ni ovde nema razlike. Momenat jeste proizvod fluksa i struje, odnosno MPS.

Šematski prikaz načina regulacije struja napajanja statora sinhronog motora dat je na narednoj slici. Time se obezbeđuje da ugao ξ bude $\pi/2$.



Slika br.13.8.20. TTVP sa strujnim regulatorom i SM

Na slici je prikazana šema veza SM, TTVP-a, i strujnog regulatora. Da bi regulacija sinhronog motora bila efikasna tj. uopšte moguća u kolu motora mora postojati

inverzor. Na njegovom izlazu je napon impulsne prirode koji, ako se prekidačima upravlja na odgovarajući način, ima srednju vrednost koja je prostoperiodična veličina u vremenu. Prekidačima upravlja strujni regulator. On ustvari predstavlja logiku celog upravljanja. Komparacijom željene vrednosti struje sa merenim (ostvarenim) vrednostima odlučuje koji prekidač treba biti uključen (odnosno isključen) i koje vreme. Na nacrtanoj šemi ne zadaju se struje već potreban momenat. Iz te informacije se računskim putem, množenjem sa konstantom K, dobija vrednost o potrebnoj struji. Na tri gornja prekidača postoje pojačavači a na donjima invertori sa pojačavačima. Na taj način je izbegnuta situacija da oba prekidača budu u isto vreme uključena i da se na taj način izazove kratak spoj. Senzorom se meri ugao (trenutna pozicija) rotora.

13.8.b.1 Izvođenje zamenske šeme statora SM za stacionarna stanja

Izvršimo određena prilagođenja opštog modela za mašine naizmenične struje da bi smo izveli šemu za stacionarna stanja SM. Postavimo naš dq kordinatni sistem tako da njegova d osa bude kolinearna sa rotorskim fluksom. Neka se dq kordinatni sistem okreće sinhronom brzinom.

Ako naponsku jednačinu po d osi pomnožimo sa 1, a po q osi sa j i uvrstimo izraze za flukseve, sabirajući naponske jednačine dobija se

$$u_d + ju_q = R_s(i_d + ji_q) + L_s\left(\frac{di_d}{dt} + j\frac{di_q}{dt}\right) - \omega_s L_s(i_q - ji_d) + j\omega_s \Psi_{Rm} \quad (12.8.74)$$

pri čemu je

$$\Psi_d = L_s i_d + \Psi_{Rm} \quad (12.8.75)$$

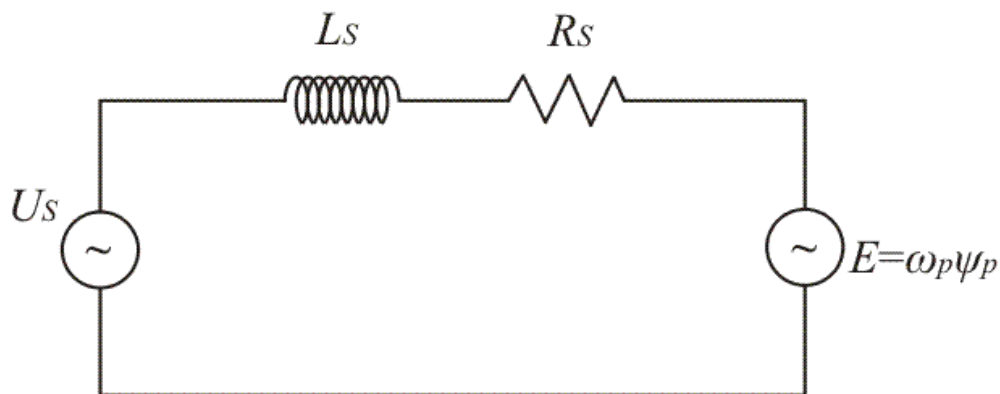
$$\Psi_q = L_s i_q + 0 \quad (12.8.76)$$

Gornja jednačina, ako se uvaži činjenica da su u stacionarnim stanjima izvodi veličina po vremenu jednaki nuli, može da se napiše kao

$$\underline{u}_s = (R_s + j\omega_s L_s)\underline{i}_s + j\omega_s \Psi_{Rm} \quad (12.8.77)$$

što predstavlja jednačinu koja opisuje SM u stacionarnim stanjima.

Zamenska šema statora za stacionaran režim data je na slici:



Slika br.13.8.21. Električna šema sinhronog motora za stacionarna stanja

13.8.b.2 Karakteristični režimi rada

13.8.b.2.1 Polazak

Poznato nam je da vrednost polaznog momenta (u najvećem broju slučajeva) veća od momenta koji je potreban za održavanje kretanja i stoga je potrebno odrediti polazni momenat i njemu odgovarajuću polaznu struju.

Promena napona u pretvaračima je ograničena i kreće se od 0 do U_{max} . Maksimalni izlazni napon pretvarača jednak je nominalnom naponu motora:

$$U_{max}^{TTVP} = U_{nom} \quad (12.8.78)$$

Jednakost maksimalnog napona pretvarača i nominalnog motora nije slučajna. Jednostavno, pretvarači se tako prave, da njihov maksimalni napon odgovara nominalnom naponu motora. Pretvarači mogu kontinualno menjati napon od 0 do U_{nom} . Za veće napone nema potrebe jer bi oni ugrozili izolaciju motora ili ubrzali njeno starenje.

Polazna struja isključivo zavisi od potrebnog polaznog momenta, pod uslovom da je uspostavljeno nominalno magnećenje (dostignuta je nominalna vrednost fluksa). Polazna struja nije mala jer je polazni momenat veliki. Struja je određena izrazom

$$i_{q\,pol} = \frac{M_{em\,pol}}{\frac{3p}{2}\Psi_d} \quad (12.8.79)$$

odakle se vidi da ako želimo da pokrenemo vozilo treba nam tolika struja. Sa druge strane, ako pogledamo u zamensku šemu, uviđamo da će napon napajanja morati dostići baš onu vrednost koja je potrebna da stvori polaznu (potrebnu) struju, što je inače mala vrednost. To se vidi iz sledećeg izraza

$$\frac{I_s}{\underline{Z_s}} = \frac{U_s}{\underline{Z_s}} \quad (12.8.80)$$

jer je brzina 0 pa je i indukovana ems = 0.

Ako uzmemo u obzir praktične vrednosti statorskog otpora (jer pri polazku induktivnosti nisu dominantne), na “per unit” bazi (na bazi relativnih jedinica):

$$R_s \approx 0,03 \div 0,001 \text{ za snage } P \sim 1-100 \text{ kW} \quad (12.8.81)$$

i za maksimalnu vrednost napona $U_s = 1p.u.$, dobija se jako velika vrednost polazne struje, reda više desetina ili stotina relativnih jedinica. Kako se u vuči na vučne motore pri polasku nikada ne dovodi nominalna vrednost napona, već ona koja je potrebna da se dobije potreban polazi momenat, tako ovako velike polazne struje nisu realne.

Podsetimo se da je bazna vrednost otpornosti izvedena bazna veličina i da se računa kao

$$R_B = \frac{U_B}{I_B} = \frac{U_{nom}}{I_{nom}} \quad . \quad (12.8.82)$$

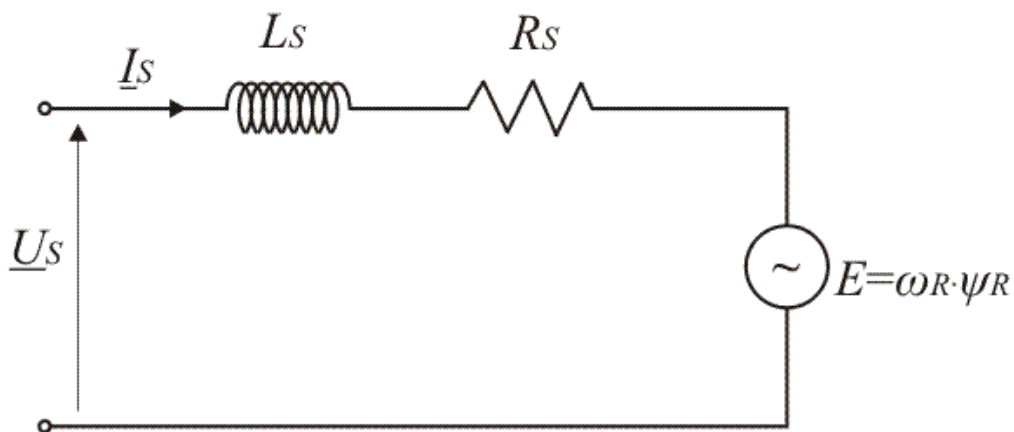
I_{max} je definisana strujnim kapacitetom poluprovodnika vučnog pretvarača (ređe sa strujnim kapacitetom motora) i ograničena je na:

$$I_{max} \approx (3 \div 4) I_{nom} \quad (12.8.83)$$

Strujni kapacitet je veličina koja nam govori koja je maksimalna amplituda (vrednost) struje koju mogu podneti određeni elementi a da ne dođe do njihovog trajnog uništenja.

13.8.b.2.2 Oblast slabljenja polja

Posmatrajmo zamensku šemu:



Slika br.13.8.22. Električna šema sinhronog motora za stacionarna stanja

Izraz za struju statora:

$$\underline{I}_S = \frac{\underline{U}_S - \underline{E}}{\underline{Z}_S} \quad (12.8.84)$$

Sve dok je

$$|U_{nom}| \geq |\omega_R \psi_R| \quad (12.8.85)$$

postoje uslovi za regulaciju struje (naponska margina).

Kad je

$$\omega_R^{nom} \psi_R = U_{nom} \quad (12.8.86)$$

$$\omega_R > \omega_R^{nom} \quad (12.8.87)$$

ne može se vršiti regulacija struje.

Tada je indukovana elektromotorna sila veća od napona. Ovo bi bila gornja granica regulacije brzine kada se ne bi mogla *ems* održavati na svojoj nominalnoj vrednosti. Povećanje brzine dovelo do povećanja indukovane *ems* koja bi prevršila nominalni napon i time ugrozila izolaciju.

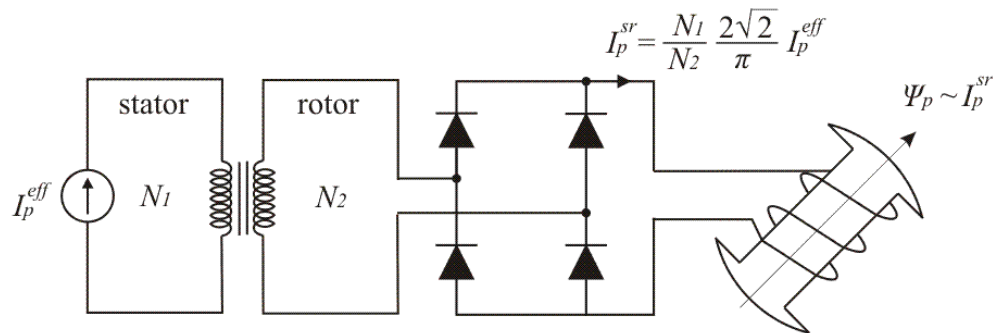
Potrebno je izvršiti slabljenje polja.

Kod sinhronog motora sa namotanim rotorom, sa kliznim prstenovima, moguće je pobudnom strujom smanjivati ψ_R . Treba da važi:

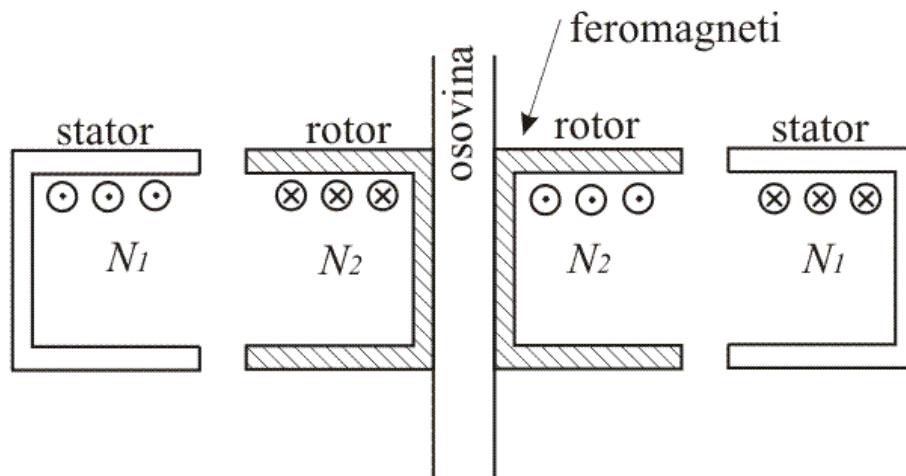
$$\psi(\omega) = \psi_{nom} \frac{\omega_{nom}}{\omega} \quad (12.8.88)$$

Ovim se obezbeđuje da *ems* ostaje konstantna.

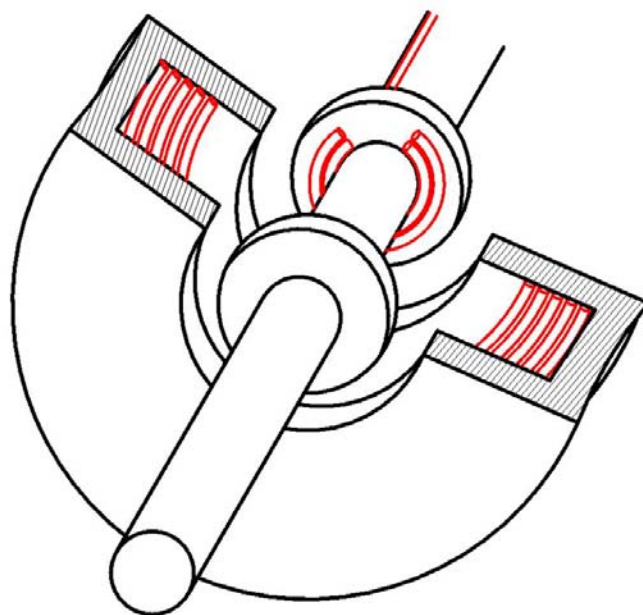
U električnoj vuči se koriste sinhroni motori sa namotanim rotorom bez kliznih prstenova. Oni poseduju obrtni transformator, kod koga je jedan deo na statoru a drugi na rotoru, kao što je prikazano na slici:



Slika br.13.8.23. Način napajanja pobudnog (rotorskog) namotaja



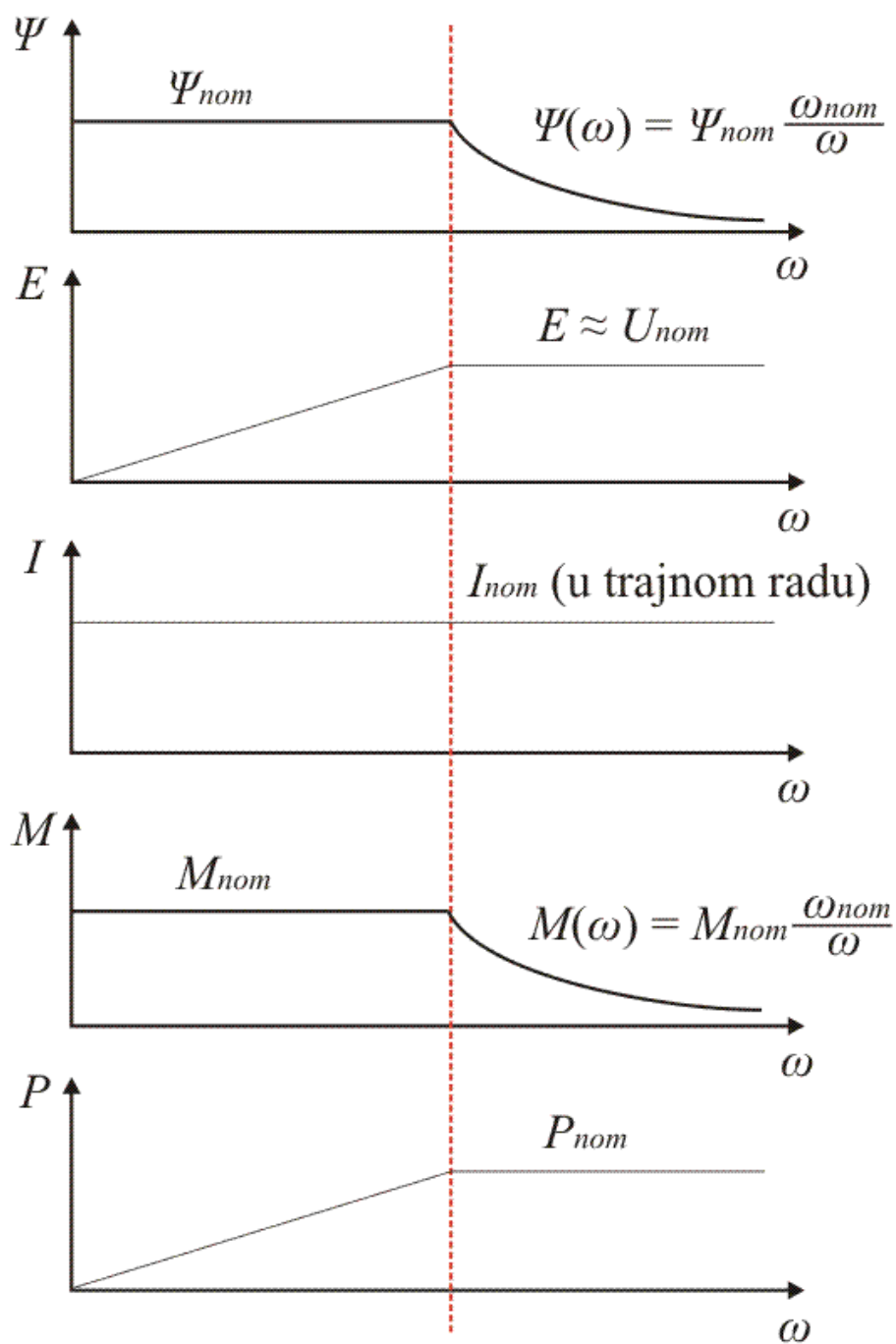
Slika br.13.8.24.(a) Poprečni prikaz beskontaktnog transformatora



Slika br.13.8.24.(b)

Kada su u pitanju zaštite od kratkih spojeva (faznih i međufaznih) i zemljospojeva treba reći da je kod ovakvog sistema napajanja rotora ne moguće izvesti zaštitu od zemljospoja pobudnog namotaja ako ne postoji poseban klizni prsten.

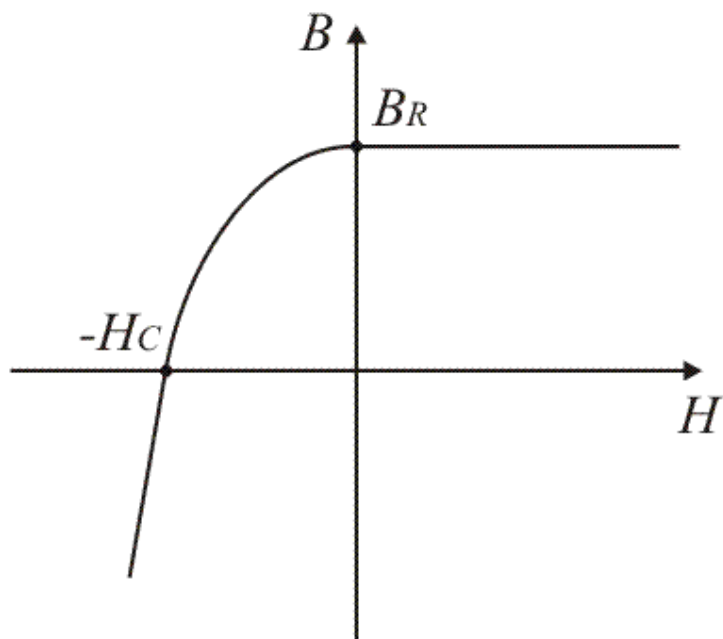
Sledeći dijagrami, koji su dati za sinhroni motor, ekvivalentni su dijagramima za mašine jednosmerne struje:



Slika br.13.8.25. Oblici fluksa, napona, struje, momenta, i snage u zavisnosti od brzine

13.8.b.3 Sinhroni motor sa permanentnim magnetima na rotoru

Karakteristika magnećenja permanentnih magneta koji se koriste u sinhronim motorima je prikazana na slici:



Slika br.13.8.26. Karakteristika magnećenja permanentnih magneta

Vidi se da je magnetna indukcija B konstantna sve dok se magneti ne izlože demagnetišućem, negativnom magnetnom polju:

$$H \approx -10000 \left[\frac{A}{m} \right] \quad (12.8.89)$$

Tu postoji opasnost da se trajno izgube magnetne osobine. Nagib krive u prvom kvadrantu je, dakle, približno jednak permeabilnosti vakuuma, odnosno vazduha (μ_0):

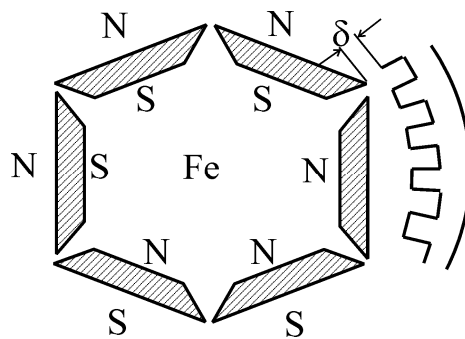
$$\mu_0 \approx \frac{\Delta B}{\Delta H} \quad (12.8.90)$$

Iz ovoga sledi da permanentni magnet na eksterno dovedeno magnetno polje (namotajem statora) reaguje kao da je vazduh. To znači da mu je magnetni otpor na linije stranog polja dosta velik.

Postoje dve vrste montaže permanentnih magneta na rotor SM:

- površinska montaža,
- ugradnja u unutrašnjost magnetnog kola rotora.

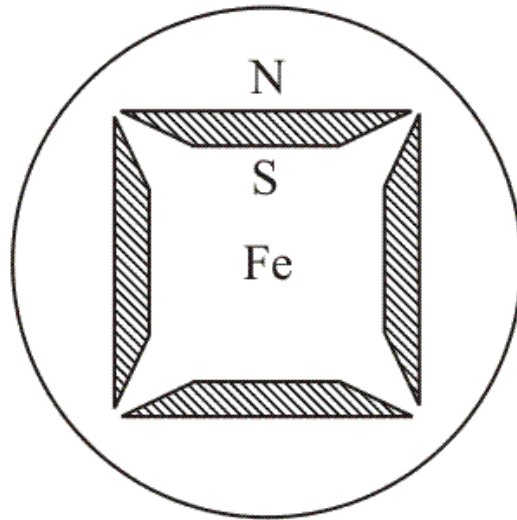
Način površinske montaže permanentnih magneta na telo rotora prikazan je na slici:



Slika br.13.8.27. Površinska montaža magneta na rotor

U magnetnom pogledu (jer je $\Delta B / \Delta H \approx \mu_0$) ekvivalentni zazor koji vide linije magnetnog polja je jednak zbiru vazdušnih zazora i debljine permanentnog magneta. To znači da ne mogu raditi u oblasti slabljenja polja.

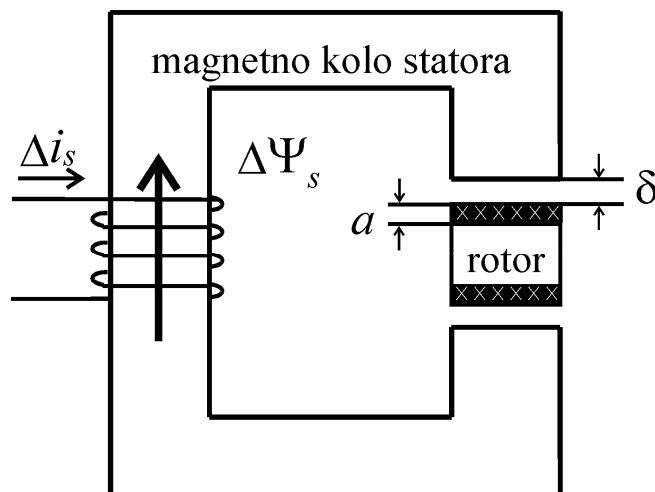
Permanentni magneti se ugrađuju u telo rotora i na način prikazan na slici:



Slika br.13.8.28. Ugradnja magneta u unutrašnjost rotora

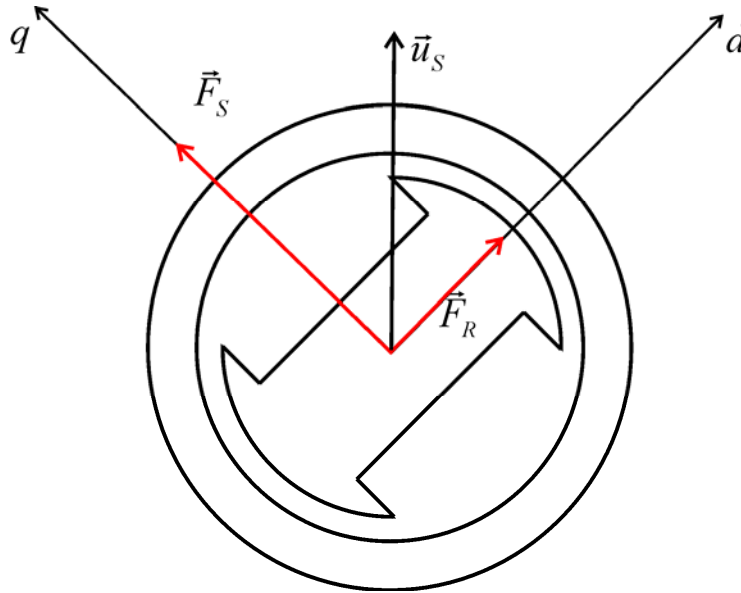
Statorski fluks sada nailazi na magnetni materijal a ne na permanentni magnet pa se širina zazora ne povećava njihovom montažom.

Šematski prikaz magnetnog kola mašine dat je na slici:



Slika br.13.8.29. Ekvivalentna šema magnetnog kola motora

Položaj uzdužne i poprečne ose prikazan je na slici:



Slika br.13.8.30. Položaj uzdužne i poprečne ose za SM sa istaknutim polovima

Naponske jednačine statora po uzdužnoj d - osi i po poprečnoj q - osi:

$$u_d = R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_R \psi_q \quad (12.8.91)$$

$$u_q = R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega_R \psi_d \quad (12.8.92)$$

Induktivnost namotaja statora:

$$L_s = \frac{\Delta \psi_s}{\Delta i_s} = \frac{N_s^2}{R_\mu} = \frac{N_s^2 \mu_{Fe} S_{Fe}}{\Sigma \delta} \sim \frac{1}{\Sigma \delta} \quad (12.8.93)$$

gde je:

$\Sigma \delta$ - ukupni zazor u magnetnom kolu

Izrazi za komponente statorskog fluksa su:

$$\psi_d = \psi_R + L_S i_d \quad (12.8.94)$$

$$\psi_q = L_s i_q \quad (12.8.95)$$

Fluks ψ_R potiče od permanentnog magneta na rotoru i on je konstantan. Posledica statorske struje je $L_s i_d$.

Induktivnost $L_s \sim 0.03 p.u.$ što je veoma malo i karakteristično za sinhroni motor sa površinskom montažom **permanentnih magneta**. To je zbog toga što je ukupna vrednost zazora:

$$\sum \delta = \delta_{kroz_vazduh} + \delta_{kroz_magnet} \quad (12.8.96)$$

Mala vrednost L_s kod površinske montaže **permanentnih magneta** daje loše karakteristike u zoni slabljenja polja.

Ako želimo da se fluks ψ_d menja kao:

$$\psi_d = \psi_{nom} \frac{\omega_{nom}}{\omega}; \quad (\psi_{nom} = \psi_R) \quad (12.8.97)$$

jer u zoni slabljenja polja fluks opada sa porastom brzine, tada mora biti:

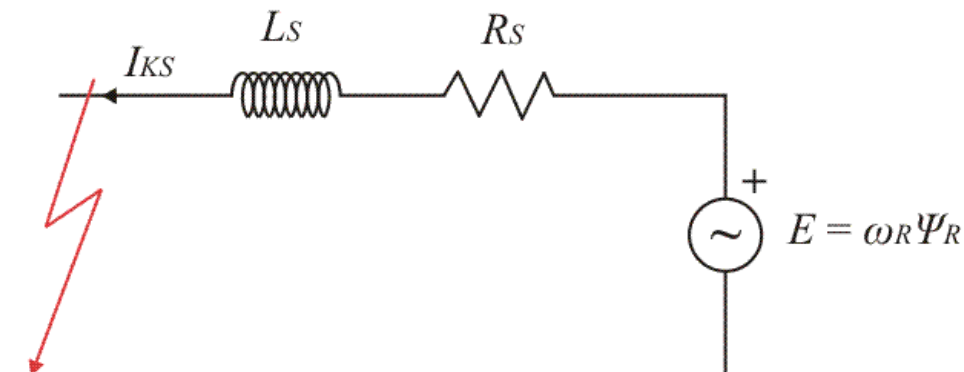
$$i_d = -\frac{\psi_{nom}}{L_s} \left(1 - \frac{\omega_{nom}}{\omega}\right) \quad (12.8.98)$$

Ovom strujom vrši se demagnetizacija, odnosno slabljenje polja.

Malo L_s traži veliku struju i_d za isto slabljenje polja pa rad u oblasti slabljenja polja nije moguć.

- Ponašnje u havariskim režmima

Razmatraće se slučaj kratkog spoja, koji je šematski prikazan:



Slika br.13.8.31. Električna šema sinhronog motora za stacionarna stanja u slučaju kratkog spoja na priključcima motora

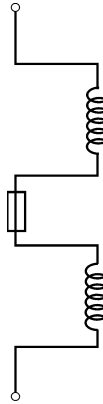
Struja kratkog spoja:

$$I_{KS} = \frac{\psi_R \omega_R}{|Z_{ks}|} \quad (12.8.99)$$

U impedansi Z_{ks} dominantna je induktivnost. Ako je induktivnost velika ($0,5p.u.$), struja kratkog spoja neće biti velika ($2p.u.$).

Kod površinske montaže induktivnost je mala pa velika struja I_{ks} (nekoliko desetina puta veća od nominalne) dovodi do razaranja permanentnog magneta usled demagnetizacije. Pošto se vozilo kreće, rotor će nastaviti da se obrće (zbog sprege sa točkovima), što dalje demagnetiše rotor. Velika struja spaljuje statorski namotaj. Ova vozila ne moguće je pokrenuti dok je motor u kratkom spoju. Razvija se kočni moment sve dok se mehanički ne razdvoji motor od točkova. (Nije moguće odvući ih do garaže.)

Zbog ovih opasnosti statorski namotaj se izrađuje iz više sekcija koje su štice osiguravaju topljivim osiguračima (5 do 7 delova namotaja), kao na slici:



Slika br.13.8.32. Sekcionisanje namotaja statora

Kod motora manjih snaga ne vrši se sekcionisanje.

13.8.b.4 Eksploatacione karakteristike (trjni rad)

Maksimalni razpoloživi momenat sa kojim je moguće trajno raditi je nominalni u oblasti rada do nominalne brzine. U oblasti slabljenja polja maksimalni momenat motora je određen strujama i_d i i_q i vrlo brzo opada sa porastom brzine.

U slučaju sinhronih motora sa površinskom ugradnjom permanentnih magneta, porastom demagnetizacione struje i_d utiče se na smanjenje fluksa. Pojasnimo zašto se i_d naziva demagnetizacion struja. Znamo da indukovana ems ni u kom slučaju ne sme biti veća od nominalnog napona, odnosno

$$E_{ind} \leq U_{nom} \quad (12.8.100)$$

zbog opasnosti od proboja u izolaciji. Takođe znamo da je fluks u d osi dosta veći od fluksa u q osi, odnosno

$$\Psi_d = (L_d i_d + \Psi_{Rm}) \gg \Psi_q = (L_q i_q) \quad (12.8.101)$$

jer smo mi postavili osu d u pravcu rotorskog fluksa koji je dominantan.

Iz prethodnog sledi da se indukovana *ems*, koja se mora održavati na konstantnoj vrednosti, može približno izraziti kao

$$E_{ind} \approx \omega_R (L_d i_d + \Psi_{Rm}) \leq U_{nom} \quad (12.8.102)$$

Znači, da indukovana *ems* ne sme imati vrednosti veće od nominalne vrednosti za indukovanu *ems*. Drugačije rečeno,

$$\omega_R (L_d i_d + \Psi_{Rm}) \leq \omega_{Rnom} \Psi_{Rm} \quad (12.8.103)$$

nominalni napon se može napisati kao

$$U_{nom} \approx \omega_{Rnom} \Psi_{Rm} \quad (12.8.104)$$

samo ako je statorski otpor zanemaren, za šta često postoji opravdanje.

Ako želimo da imamo na raspolaganju brzine veće od nominalne moramo smanjivati fluks. To se na osnovu jed. br. (11.2.103) može uraditi strujom *i_d*.

Ako je

$$\omega > \omega_{Rnom} \quad (12.8.105)$$

važi

$$L_d i_d + \Psi_{Rm} = \frac{\omega_{Rnom}}{\omega_R} \Psi_{Rm} \quad (12.8.106)$$

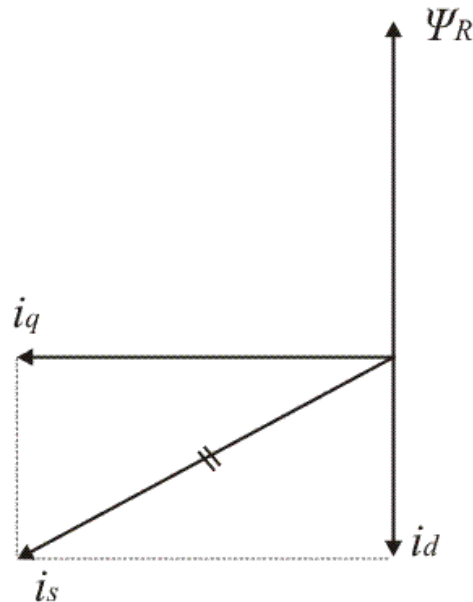
odakle se dolazi do oblika za struju demagnetizacije

$$i_d = -\frac{1}{L_d} \left(1 - \frac{\omega_{Rnom}}{\omega_R}\right) \Psi_{Rm} \quad (12.8.107)$$

U praksi vrednost *L_d* je dosta mala pa proizilazi da će struja demagnetizacije biti dosta velika. Komponenta struje *i_q* se takođe menja, i s obzirom da je momenat

srazmeran toj struji njegovo opadanje neće biti srazmerno $1/\omega$ već brže, pa snaga neće biti konstantna.

Prema vektorskom dijagramu



Slika br.13.8.33. Vektorski dijagram struje statora i njenih komponenti po d i q osi

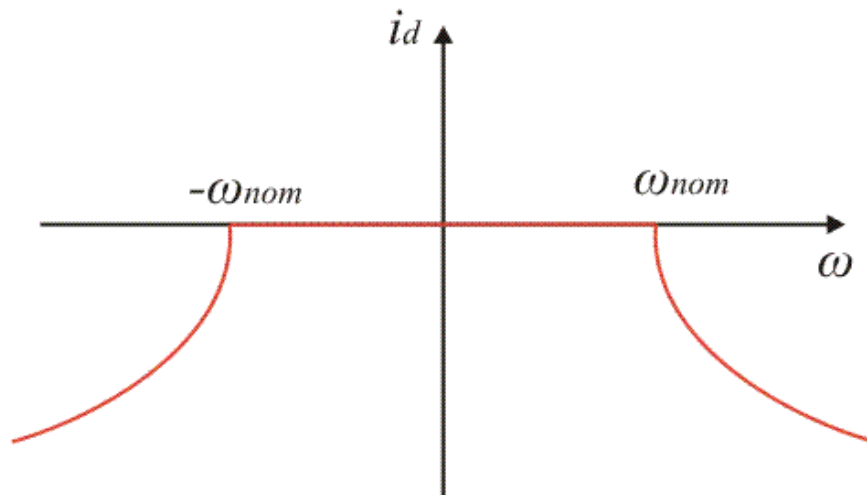
sva struja se injektira u q osu ako radimo u oblasti do nominalnih brzina, dok ako se uđe u oblast slabljenja polja potrebna nam je i demagnetizaciona struja i_d . Njeno povećanje utiče tako da, ako ne želimo da nam statorka struja nadmaši nominalnu struju motora, struja i_q mora biti manja od nominalne.

To se vidi iz:

$$i_q = \sqrt{I_{nom}^2 - i_d^2(\omega)} < I_{nom} \quad (12.8.108)$$

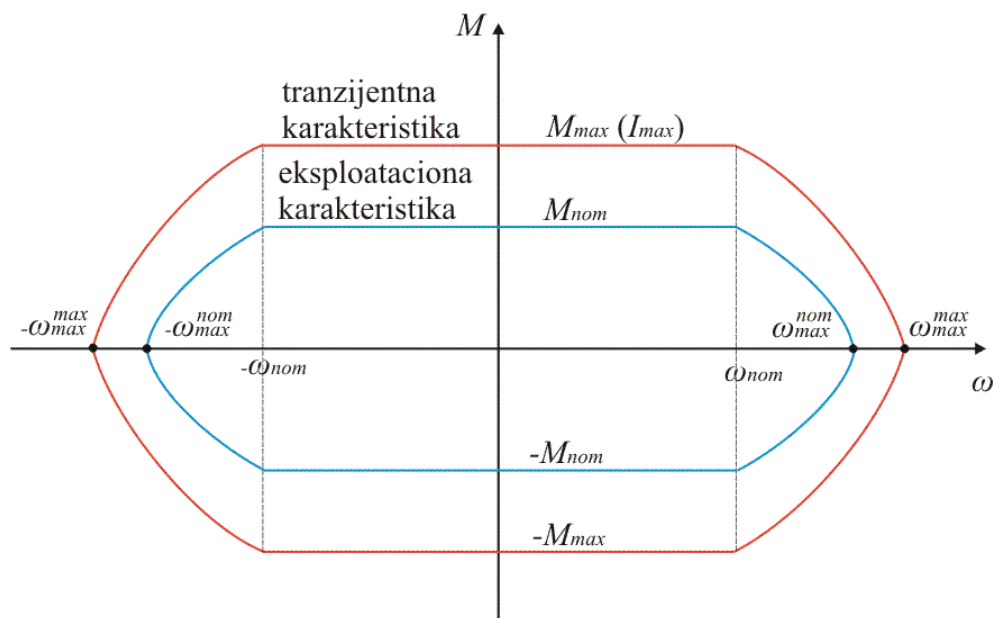
Tako se mora menjati i_q ako postoji demagnetizaciona struja i_d . Komponenta struje i_q , ona koja stvara elektromagnetni momenat, manja je od nominalne u zoni slabljenja polja.

Raspodela struje i_d pri raznim brzinama prikazana je na sledećoj slici.



Slika br.13.8.34. Oblik struje u d osi u zavisnosti od brzine.

Sinhroni motori sa površinskom ugradnjom permanentnih magneta (**veliki vazdušni zazor** → **veliki magnetni otpor** → **mala induktivnost**) ne mogu raditi u zoni slabljenja polja jer oba faktora od kojih zavisi pokretački momenat rapidno opadaju, i i_q i Ψ_d . Sva raspoloživa struja se koristi za demagnetizaciju, karakteristika je skoro četvrtasta.

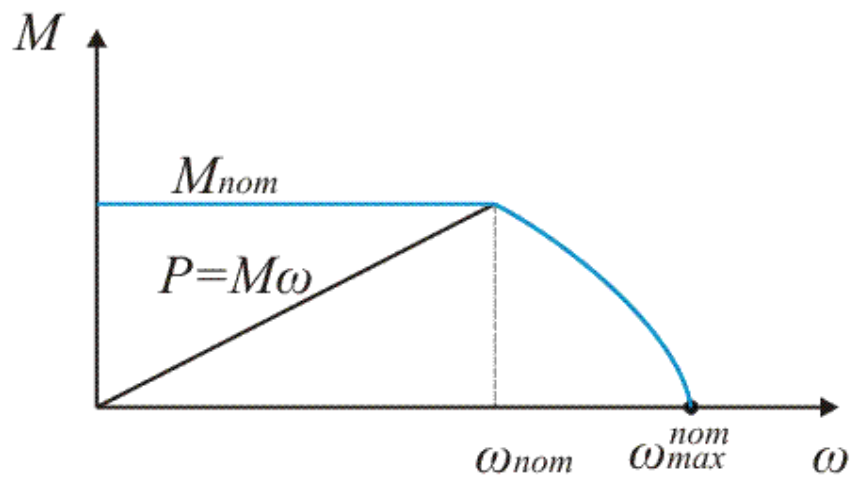


Slika br.13.8.35. Eksploataciona karakteristika za SM sa površinskom ugradnjom permanentnih magneta

Maksimalna brzina u trajnom radu se ima kada je i_q palo na nulu a i_d ima vrednost nominalne struje, tj.

$$\omega_{\max}^{\text{ekspl}} = \omega_R \Big|_{i_q=0} = \frac{\omega_{R\text{nom}}}{L_d I_{\text{nom}} + \Psi_{Rm}} \Psi_{Rm} \quad (12.8.109)$$

Sinhroni motori sa unutrašnjom ugradnjom permanentnih magneta mogu da rade u zoni slabljenja polja ali ne sa konstantnom snagom.



Slika br.13.8.36. Eksplataciona karakteristika sa linijom nominalne snage za SM sa unutrašnjom ugradnjom permanentnih magneta

Crticama je označena karakteristika koja bi se imala u eventualnom radu u zoni slabljenja polja.

Sinhroni motori su lagani, efikasni, kompaktni i daju veći elektromagnetni momenat nego asinhroni motori istih dimenzija.

13.8.b.5 Tranzijentne karakteristike (kratkotrajni rad)

Maksimalni razpoloživi momenat je maksimalni momenat motora, koji je određen maksimalnom strujom motora ili strujnim kapacitetom poluprovodnika, u oblasti rada do nominalne brzine. U oblasti slabljenja polja maksimalni momenat motora je takođe određen maksimalnim vrednostima struja i_d i i_q i vrlo brzo opada sa porastom brzine.

Maksimalna brzina koju možemo dostići u trenutnom radu se dobija iz sledećeg izraza

$$\omega_{\max}^{\text{tranz}} = \omega_R \Big|_{i_q=0} = \frac{\omega_{Rnom}}{L_d I_{\max} + \Psi_{Rm}} \Psi_{Rm} \quad (12.8.110)$$

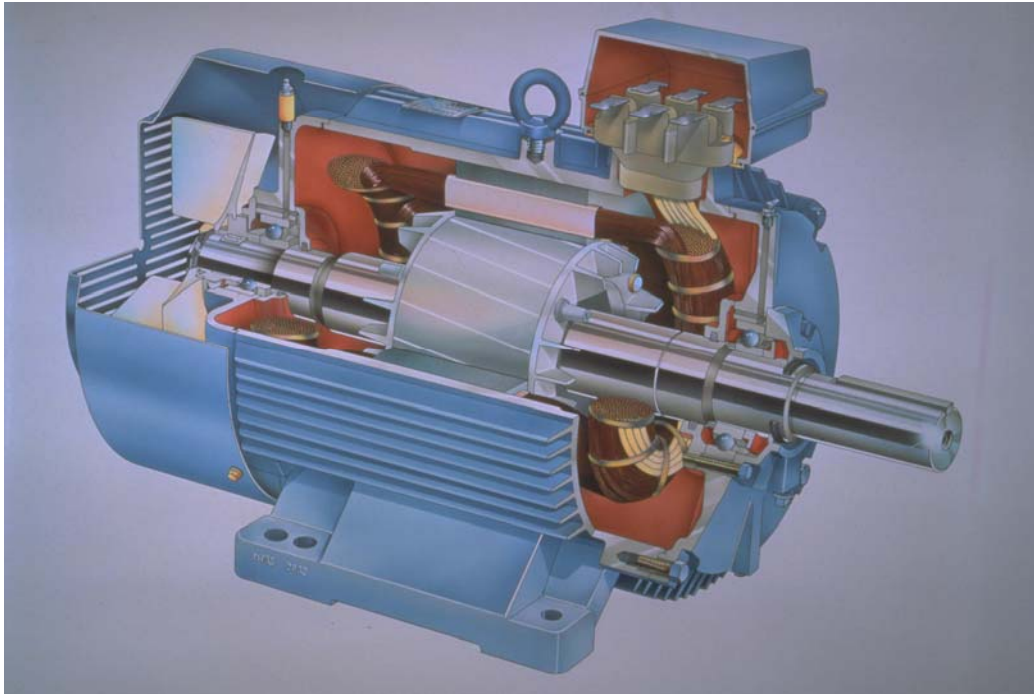
13.8.c Asinhroni vučni motor

Asinhroni vučni motor je najperspektivniji kandidat za savremene konstrukcije električnih vozila. Električna vozila ne traže da vučni motor bude standardne cilindrične izvedbe. Poželjniji je motor koji može da se ugradi u pogonsku osovinu. Konvencionalno rešenje je sa monomotorim obrtnim postoljima sa sistemom prenosnika.

Ovde nema monomotorno obrtno postolje. Rotor motora se u ovom slučaju nalazi spolja. Stator se napaja kroz osovinu. Rotor se bolje hladi. Grejanje rotora asinhronog motora je jedina njegova loša osobina.

Nešto o konstrukciji AM. Na statoru je trofazni namotaj koji preuzima ulogu induktora za razliku od SM. Rotor AM, inače indukt, je cilindrični komad

feromagnetnog materijala (gvožđa) kroz koji su probušene rupe, aksijalno po obimu. U njima se smestaju provodnici koji sa bočnih strana kratko spajaju. Jednostavna i jeftina izrada rotora AM jeste jedna od njegovih prednosti.



Slika br.13.8.37. Izgled Asinhronog motora

Često se upotrebljava linearni motor. Ukoliko bi postojala provodna gvozdena podloga po sredini pruge prekrivena aluminijumom, bio bi to rotor za asinhroni motor, a stator bi mogao da se postavi na dno vagona. [O ovakom rešenju u vuči biće naknadno reči.](#)

[Asinhroni motor se nameće kao najbolje rešenje savremenog problema pogona u električnoj vuči.](#) Motori jednosmerne struje imaju kolektor i četkice, što je u slučaju asinhronih motora eliminisano.

Asinhroni motor na sebi redovno ima trofazne namotaje da bi se ostvarilo obrtno polje sa [najmanjim brojem](#) provodnika.

Ostvaruje se n -fazni sistem sa namotima pomeranim za $2\pi/n$ i strujama vremenski pomeranim za $2\pi/n$. Za trofazni sistem prostorno i vremensko pomeranje je $2\pi/3$.

Fazni namotaj je sastavljen iz redno vezanih namotaja sinusno raspoređenih po obimu mašine. Broj žlebova je konačan tako da se ne može ostvariti idealan prostoperiodičan oblik polja.

Sa aspekta električne vuče bitna je **brza** regulacija momenta i vučne sile, zadovoljavanje polaznog momenta i slabljenje polja. U električnoj vuči se asinhroni motor ne može koristiti kao u industriji, jer je tako ne moguće ostvariti **kontinualnu** kontrolu vučne sile.

Radi postizanja kontrolabilnosti vučne sile pribegava se vektorskom upravljanju asinhronim motorom.

(Preporuka je da se prouči uputstvo za laboratorijsku vežbu broj 1)

Da bi se ostvarilo vektorsko upavljanje asinhronim motorom potrebno je ispuniti određene uslove.

1° Vučna sila se kontroliše upravljanjem **elektromagnetnim** momentom, koji je proizvod fluksa i struje. Zbog toga je potrebno da postoji regulator statorsche struje. Ako imamo dobar i brz regulator statorsche struje, obezbeđuje se da je struja jednaka referentnoj. (Referentne vrednosti se obeležavaju zvezdicom *.)

$$i_d^* = i_d^*; i_q^* = i_q^* \quad (12.8.111)$$

2° Potrebno je poznavanje položaja rotorskog fluksa

$$\theta_{\psi} = \arg(\overrightarrow{\psi_R}) \quad (12.8.112)$$

Rotorski fluks se estimira. Esimacijom se dobija položaj rotorskog fluksa. Elektromotorna sila zavisi od brzine obrtanja polja, ona daje informaciju o fluksu.

$$3^{\circ} \quad i_d^* \sim \psi_R^*, i_q^* \sim M_v^* \Rightarrow \psi_Q = 0 \quad (12.8.113)$$

Projekcija fluksa $\vec{\psi}_R$ na q -osu je nula jer je normalan na tu osu. d -osa je tačno u pravcu rotorskog fluksa.

Sa ova tri uslova, asinhroni motor će moći da se kontroliše kao motor jednosmerne struje sa nezavisnom pobudom. Imaju i identične blok dijagrame.

U jednačinama kojim se opisuje dinamika asinhronog motora, jednačinama u sinhrono rotirajućem (d,q) sistemu, uključena su izvesna zanemarenja.

Zanemarena je energija akumulirana u parazitnim kapacitivnostima. Složena struktura je modelovana skoncentrisanim parametrima, i ako je drugačija, tj. zanemareni su efekti distribuiranih parametara (svaki provodnik je vod). Smatramo da je magnetno kolo linearno, da su fluks i struja vezani matricom induktivnosti.

13.8.c.1 Izviđenje zamenske šeme AM za stacionarna stanja

Izvedimo sada zamensku šemu AM za stacionarna stanja. Podsetimo se kako izgleda model mašine za naizmeničnu struju.

$$u_d = R_s i_d + \frac{\partial \Psi_d}{\partial t} - \omega_{dq} \Psi_q \quad (12.8.114)$$

$$u_q = R_s i_q + \frac{\partial \Psi_q}{\partial t} + \omega_{dq} \Psi_d \quad (12.8.115)$$

$$u_D = R_r i_D + \frac{\partial \Psi_D}{\partial t} - \omega_k \Psi_Q \quad (12.8.116)$$

$$u_Q = R_r i_Q + \frac{\partial \Psi_Q}{\partial t} + \omega_k \Psi_D \quad (12.8.117)$$

$$J \frac{\partial \omega_r}{\partial t} = M_{em} - \Sigma M_{otp} \quad (12.8.118)$$

$$M_{em} = \frac{3p}{2} (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d) \quad (12.8.119)$$

$$\begin{pmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \\ \Psi_D \\ \Psi_Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \\ i_D \\ i_Q \end{pmatrix} \quad (12.8.120)$$

Pošto se u vuči koristi AM sa kratkospojenim rotorom, namotaji D i Q koji modeluju rotor će biti takođe kratko spojeni, tj. naponi u_D i u_Q će biti 0.

$$u_d = R_s i_d + \omega_s L_s i_d - \omega_s L_m i_D \quad (12.8.121)$$

$$u_q = R_s i_q + \omega_s L_s i_q + \omega_s L_m i_Q \quad (12.8.122)$$

$$0 = R_r i_D + \omega_k L_r i_D - \omega_k L_m i_d \quad (12.8.123)$$

$$0 = R_r i_Q + \omega_k L_r i_Q + \omega_k L_m i_q \quad (12.8.124)$$

Ako jednačine br. (13.8.122) i (13.8.124) pomnožimo sa j i saberemo sa jednačinama br. (13.8.121) i (13.8.123) sistem možemo napisati kao

$$\underline{u_s} = \underline{u_{dq}} = R_s \underline{i_{dq}} + j\omega_s L_s \underline{i_{dq}} + j\omega_s L_m \underline{i_{DQ}} \quad (12.8.125)$$

$$0 = \underline{u_{DQ}} = R_r \underline{i_{DQ}} + j\omega_k L_r \underline{i_{DQ}} + j\omega_k L_m \underline{i_{dq}} \quad (12.8.126)$$

Pomnožimo sada rotorsku jednačinu sa

$$0 = \underline{u_{DQ}} = R_r \underline{i_{DQ}} + j\omega_k L_r \underline{i_{DQ}} + j\omega_k L_m \underline{i_{dq}} \quad / \frac{\omega_s}{\omega_k} \quad (12.8.127)$$

i imaćemo sistem

$$\underline{u_s} = R_s \underline{i_s} + j\omega_s L_{\gamma s} \underline{i_s} + j\omega_s L_m (\underline{i_s} + \underline{i_r}) \quad (12.8.128)$$

$$0 = \frac{R_r}{s} \underline{i_r} + j\omega_s L_{\gamma r} \underline{i_r} + j\omega_s L_m (\underline{i_s} + \underline{i_r}) \quad (12.8.129)$$

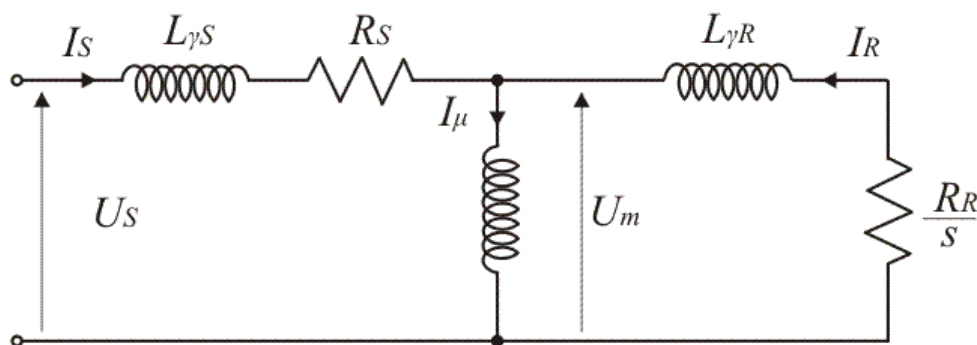
pri čemu je

$$L_s = L_{\gamma s} + L_m \quad (12.8.130)$$

i

$$L_r = L_{\gamma r} + L_m \quad (12.8.131)$$

Ove dve naponske jednačine opisuju AM u stacionarnim stanjima a mogu se predstaviti i šemom. Jednofazna zamenska šema asinhronog motora (AM) za stacionarna stanja prikazana je na slici:



Slika br.13.8.38. Električna šema asinhronog motora za stacionarna stanja

Paralelno sa otočnom induktivnošću može se postaviti i jedan otpornik kojim se modeluju gubici u magnetnom kolu.

13.8.c.2 Režimi rada AM

Rad AM možemo podeliti na rad iznad i ispod nominalne brzine:

$$\omega_R > \omega_{Rnom} \text{ i } \omega_R < \omega_{Rnom} \quad (12.8.132)$$

Klizanje, koje je mera pretvaranja energije obrtnog polja u mehanički rad i gubitke u rotoru, izračunava se:

$$s = \frac{\omega_S - p\omega_R}{\omega_S} \quad (12.8.133)$$

gde je ω_S je brzina obrtnog polja (to je sinhrona brzina), a ω_R je brzina rotora.

Učestanost klizanja je:

$$\omega_k = s\omega_S \quad (12.8.134)$$

i ona je jako mala, pa ćemo smatrati, uključujući mogućnost da broj pari polova p bude veći od jedan:

$$\omega_R \approx \frac{\omega_S}{p} \quad (12.8.135)$$

Motori sa manjim brojem pari polova ostvaruju veće brzine, i dobro je da motor bude visokobrzinski (gabaritno su manji, lakši, jeftiniji za istu snagu), ali kod dvopolonog

veći deo magnetnog kola nije iskorišćen. Različit broj pari polova se ostvaruje različitim smeštanjem namotaja u mašini. Najčešće se koristi četvoropolni asinhroni motor (dva para polova).

U zamenskoj šemi važi:

$$\underline{U}_m = \underline{U}_s - R_s \underline{I}_s - j\omega_s L_{\gamma s} \underline{I}_s \quad (12.8.136)$$

$$\underline{U}_m = j\omega_s \underline{\psi}_m \quad (12.8.137)$$

U_m je napon magnetizacije. Zanimarenjem R_s (što se ne sme uraditi pri malim brzinama jer ono ima značajnu vrednost, odnosno veliki uticaj na struju) i $L_{\gamma s}$, dobija se za fluks u grani magnećenja:

$$\underline{\psi}_m \approx \frac{\underline{U}_s}{j\omega_s} \quad (12.8.138)$$

$$\psi_m(t) = \int U_m dt \Rightarrow \psi_m^{\max} \approx \frac{U_m^{\max}}{\omega_s} \quad (12.8.139)$$

Sledi da za održavanje konstantnog fluksa statorski napon i statorska učestanost treba da se održavaju u konstantnom odnosu.

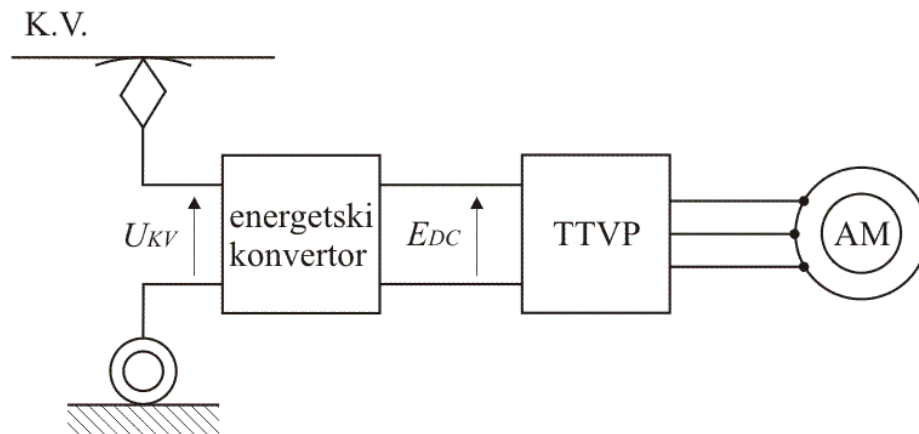
Maksimalni momenat srazmeran je kvadratu fluksa:

$$M_{\max} \sim \psi^2 \quad (12.8.140)$$

a takođe je:

$$\frac{\Delta M}{\Delta \omega} \sim \psi^2 \quad (12.8.141)$$

Da bi se omogućila kontinualna promena momenta i brzine potrebno je da postoji mogućnost kontinualne promene napona i učestanosti statora. Već je rečeno da je za ostvarenje ovih zahteva potrebno imati vučni pretvarač. Principijska šema veza data je na sledećoj slici:



Slika br.13.8.39. Napajanje AM iz TTVP-a preko energetskog konvertora

Veličine sa kontaktnog voda se moraju dovesti na nivo pogodan za *TTVP*, jer su tranzistori snage osetljivi i ne mogu se direktno priključiti na kontakti vod. Zavisno od slučaja, na mestu bloka energetskog konvertora je ispravljač ili transformator, ili je nekada taj blok nepotreban. *TTVP* je već poznati Trofazni Tranzistorski Vučni Pretvarač.

Statorski namotaj se napaja kontinualno. S obzirom da sinhroni i asinhroni motori imaju iste statorske namotaje, koriste se isti vučni pretvarači.

Pri radu iznad nominalne brzine:

$$\omega_R > \omega_{Rnom} \quad (12.8.142)$$

imamo:

$$U_s = U_{max}^{TTVP} = U_{nom}^{AM} \quad (12.8.143)$$

$$\omega_s \approx p\omega_R \quad (12.8.144)$$

$$\frac{U}{f} \neq const. \quad (12.8.145)$$

Fluks neće biti konstantan.

Invertor je napravljen tako je njegov maksimalni izlazni napon jednak nominalnom naponu asinhronog motora (naponu trajnog rada bez oštećenja izolacije).

Pri rotorskim brzinama manjim od nominalne

$$\omega_R < \omega_{Rnom} \quad (12.8.146)$$

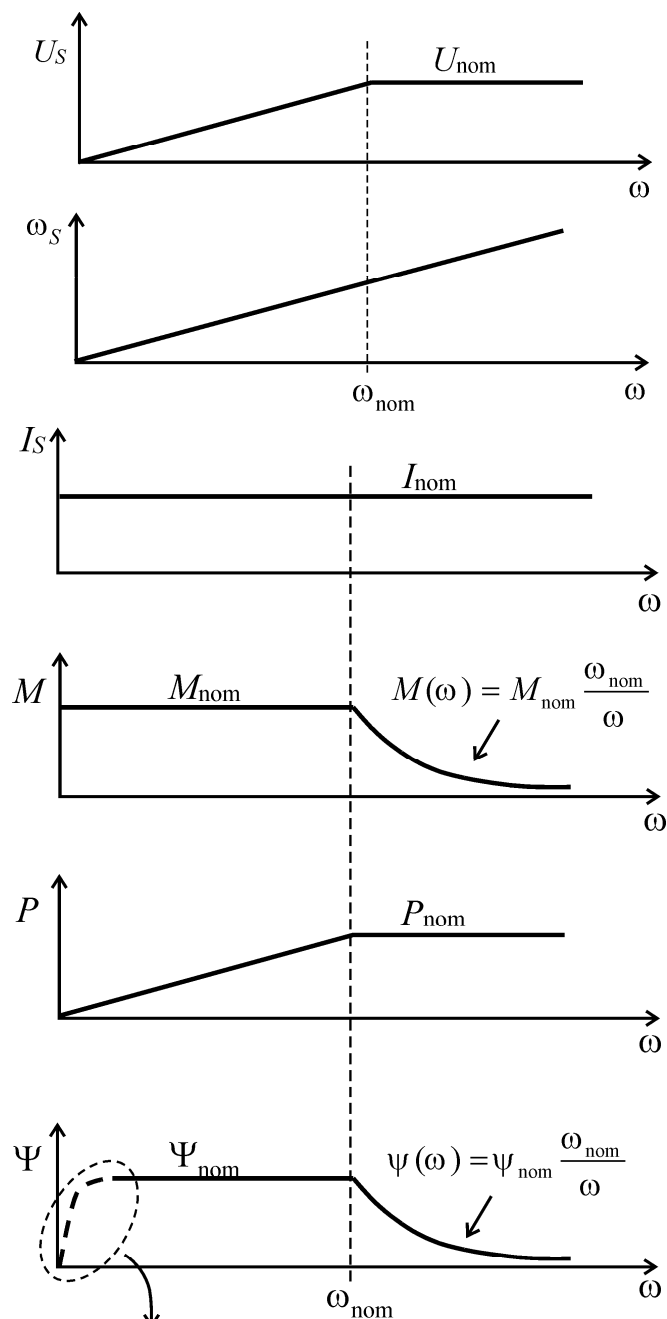
ima se:

$$\frac{U}{f} = const. \quad (12.8.147)$$

$$U_s = U_{nom} \frac{\omega_R}{\omega_{Rnom}} \quad (12.8.148)$$

Vučni motor radi u režimu konstantnog fluksa.

Sve što je **već** rečeno vidi se na sledećim dijagramima:



Ovde je dominantan pad napona $R_s I_s$
(ne može se zanemariti R_s)

Slika br.13.8.40. Zavisnosti veličina od interesa od brzine

U zoni do nominalne brzine, fluks i momenat su konstantni. Nominalna brzina je ona pri kojoj *ems* nominalno pobuđenog motora dostiže nominalnu vrednost napona. Kod asinhronog motora ne može *ems* biti veća od nominalnog napona, za razliku od sinhronih motora i motora jednosmerne struje sa nezavisnom pobudom. Ako se

sinhrona mašina zavrti brže od nominalne brzine, ems će biti veća od nominalnog napona.

Potrebno je koristiti što veću vrednost fluksa. Tendencija je da motor radi sa:

$$\psi = \psi_{nom} = \psi_{max} \quad (12.8.149)$$

Iz navedene zamenske šeme asinhronog motora sledi:

$$\underline{\psi}_m = \frac{U_m}{j\omega_s} = \frac{U_s}{j\omega_s} - \frac{I_s(j\omega_s L_{js} + R_s)}{j\omega_s} \quad (12.8.150)$$

Oдавде se vidi da je za veliko ω_s , fluks konstantan.

Pri malim brzinama moraju se vršiti merenja statorske struje, mora se poznavati R_s (može i L_{js}) i mora se podešavati napon U_s . Pri polasku mora se odstupiti od $U/f=const.$ kako bi se kompenzovao pad napona na statorskoj impedansi. **Postoje razne vrste kompenzacije ali najjednostavnija je da se statorski napon ne spušta ispod određene vrednosti dok se brzina reguliše sa učestanošću od nule pa naviše.** Treba napraviti da bude $U_s=f(\omega_s, I_s)$.

Kada se dostigne nominalna brzina nije više moguće povećavati napon. Rotorski fluks se dobija sa statorske strane, od statora se injektuje struja magnetizacije. Nema problema sa slabljenjem polja. Asinhroni motor automatski, prelazi u zonu slabljenja polja pri brzinama većim od nominalne. To je njegova inherentna osobina. Napon je sada konstantan. Momenat i fluks su obrnuto srazmerni brzini. Snaga je konstantna. Potrebno je, dakle, samo povećati učestanost, pa pošto se napon ne menja fluks ima oblik kao na grafiku. Kod motora jednosmerne struje ako $\omega > \omega_n$, i ako ne smanjimo pobudnu struju biće $U > U_{nom}$, pojaviće se kružna vatra. Potrebna je svesna akcija da bi se ostvarilo slabljenje polja. Kod asinhronih motora prelazak u oblast slabljenja polja se odvija prirodno.

U oblasti velikih brzina ne može se raditi u režimu konstantne snage ukoliko je brzina tri do četiri puta veća od nominalne. Postavlja se pitanje koja je maksimalna brzina u

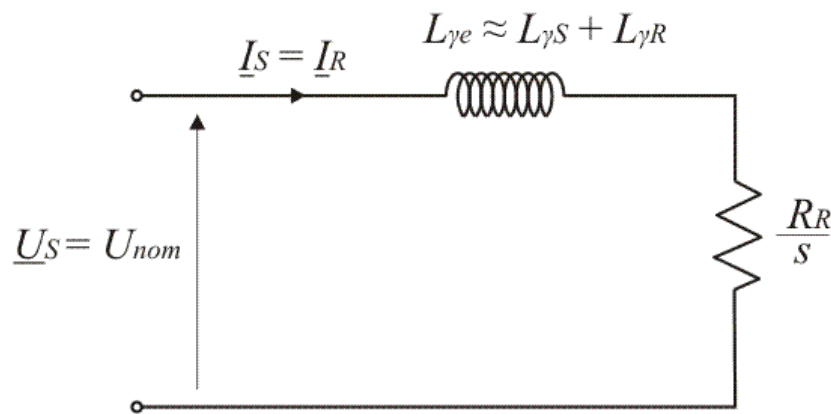
zoni slabljenja polja pri kojoj će snaga još uvek biti konstantna. Koje su granice asinhronog motora? Snaga koju motor daje na osovini približno je jednaka snazi obrtnog polja.

$$P_{ob} = 3 \frac{R_R}{s} I_R^2 \approx P_V = M_{em} \omega_R \quad (12.8.151)$$

Izraz za elektromagnetni momenat je:

$$M_{em} = p \frac{P_{ob}}{\omega_s} \quad (12.8.152)$$

Zamenska šema u oblasti slabljenja polja se razlikuje od prethodno date šeme. Magnetni otpor je manji, struja magnećenja je mala pa se zanemaruje. Magnetno kolo nije zasićeno. Struja statora jednaka je struji rotora. Može se, dakle, nacrtati:



Slika br.13.8.41. Električna šema asinhronog motora za stacionarna stanja sa zanemarenjem grane magnećenja

Izraz za snagu obrtnog magnetnog polja konvencionalnog AM (naponski napajano) je:

$$P_{ob}(\omega_S, s) = 3 \frac{R_R}{s} \frac{U_S^2}{\left(\frac{R_R}{s}\right)^2 + (L_{\gamma e} \omega_S)^2} \quad (12.8.153)$$

Ova snaga je maksimalna kada je:

$$\arg(\underline{Z_M}) = \frac{\pi}{4} \quad (12.8.154)$$

Tada je:

$$\frac{R_R}{s} = L_{\gamma e} \omega_S \quad (12.8.155)$$

Kada se to uvrsti u izraz za snagu obrtnog polja dobija se konačno izraz za maksimalnu snagu:

$$P_{\max} = \frac{3}{2} \frac{U_S^2}{L_{\gamma e} \omega_S} \quad (12.8.156)$$

Prevalno klizanje izračunava kao:

$$s_{pr} = \frac{R_R}{X_{\gamma e}} = \frac{R_R}{L_{\gamma e} \omega_S} \quad (12.8.157)$$

$$s_{pr_{nom}} = \frac{R_R}{L_{\gamma e} \omega_{nom}} \quad (12.8.158)$$

Takođe važi:

$$s_{pr} \omega_S = const. = \frac{R_R}{L_{\gamma e}} \quad (12.8.159)$$

U oblasti slabljenja polja maksimalna snaga i maksimalni momenat opadaju sa porastom brzine:

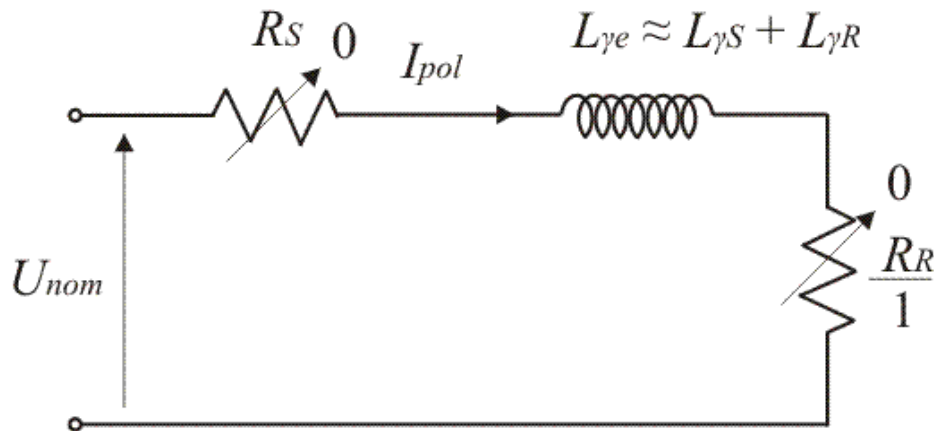
$$P_V^{\max} \sim \frac{1}{\omega_S}; M_V^{\max} \sim \frac{1}{\omega_S^2} \quad (12.8.160)$$

Sada će se videti koja je to brzina iznad koje ne može da se razvije snaga P_{nom} . Za $P_{nom}=1p.u.$, $P_V=P_{nom}$, $2L_{\gamma e} \omega_S=1p.u.$ sledi :

$$\omega_S^{\max} \Big|_{P=P_{nom}} [p.u.] = \frac{1}{2L_{\gamma e} [p.u.]} \quad (12.8.161)$$

$$L_{\gamma e} [p.u.] = \frac{L_{\gamma e} \omega_{nom}}{Z_{nom}}, \quad Z_{nom} = \frac{U_{nom}}{I_{nom}} \quad (12.8.162)$$

Da bi se izvršila procena, uzećemo sledeću šemu sa zanemarenjima:



Slika br.13.8.42. Električna šema asinhronog motora za stacionarna stanja bez grane magnećenja

Polazna struja je približno:

$$I_{pol} \approx \frac{U_{nom}}{L_{\gamma e} \omega_{nom}} \Rightarrow I_{pol} [p.u.] \approx \frac{1}{L_{\gamma e} [p.u.]} \quad (12.8.163)$$

Za slučaj $I_{pol}=5I_{nom}$ i $L_{\gamma e}=0,2p.u.$ dobija se:

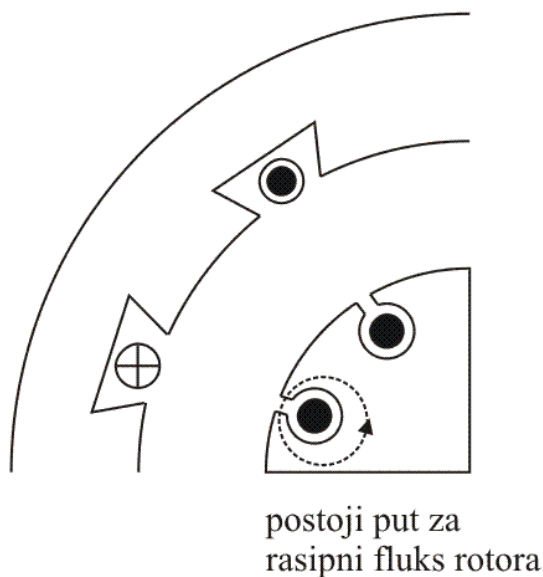
$$\omega_s^{\max} = 2,5p.u. \quad (12.8.164)$$

Kod konvencionalnih asinhronih motora je

$$L_{\gamma e} \sim 0,2p.u. \quad \text{i} \quad \omega_s^{\max} \Big|_{P_{nom}} \sim 2,5p.u. \quad (12.8.165)$$

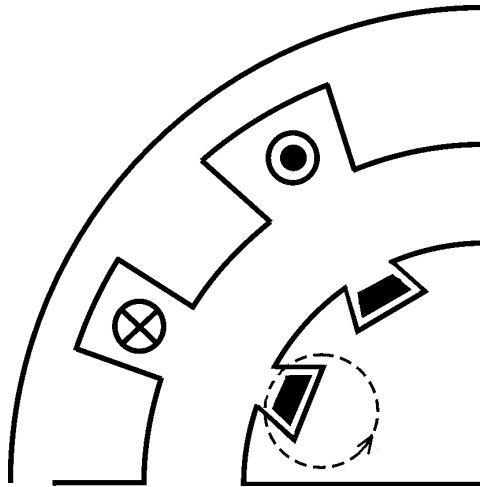
Ova polazna struja se dobija kod konvencionalnih motora, ali u električnoj vuči se motor priključuje ne direktno na naizmenični napon već preko pretvarača.

Sada će se videti kakav je rasipni fluks kod konvencionalnog asinhronog motora. Zbog ograničenja polazne struje žlebovi na rotoru su poluzatvoreni. Veliko je rotorsko rasipanje, mali je magnetni otpor, induktivnost rasipanja rotora je veća pa je polazna struja manja.



Slika br.13.8.43. Povećanjem rasipne induktivnosti se ograničava polazna struja

Da bi se umanjila vrednost induktivnosti $L_{\gamma e}$, kod motora za primenu u električnoj vuči žlebovi na rotoru se realizuju kao otvoreni, što je prikazano na slici:



Slika br.13.8.44. Otvoreni žlebovi na rotoru – mala rasipna induktivnost

Ovde rasipni fluks rotora nailazi na veći magnetni otpor pa je:

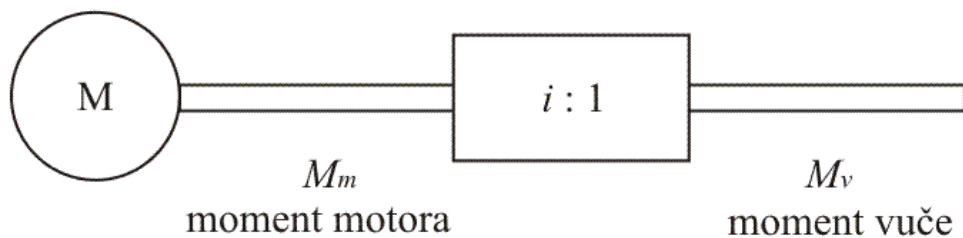
$$L_{\gamma e} \sim 0,1; \quad i \quad \omega_s^{\max} \Big|_{P=P_{nom}} \sim 5 \quad (12.8.166)$$

Svako dalje umanjeње rasipnog fluksa moralo bi biti praćeno povećanjem komutacione učestanosti da se ne bi povećala talasnost struje motora

$$\Delta I \sim \frac{1}{L_{\gamma e} f_{kom}} \quad (12.8.167)$$

Ovde takođe postoje ograničenja o kojima je ranije bilo reći. Praktično se rasipni fluks drži u granicama 0,05 do 0,1 p.u.

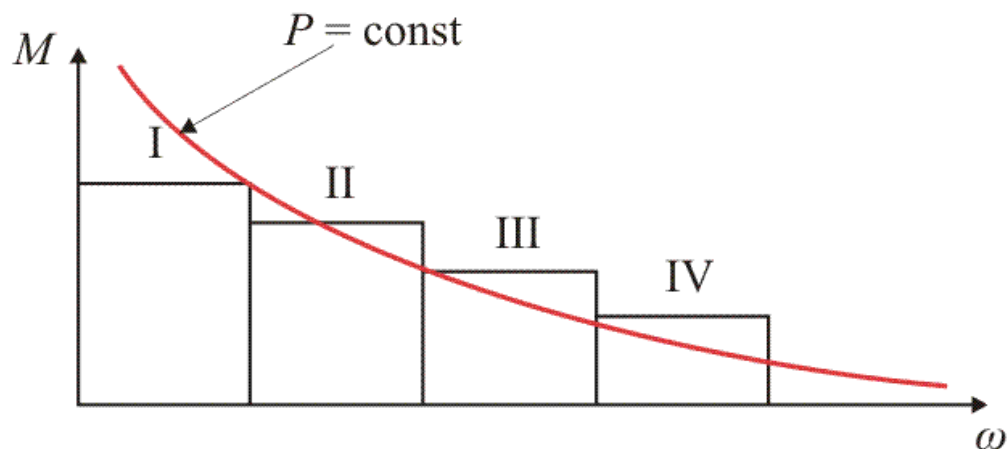
Ključni problem u vući je održavanje konstantne snage. Pri korišćenju višestepenog prenosa, koji se može ostvarivati mehanički pomoću menjača, na izlazu iz reduktora moment vuče i brzina su:



Slika br.13.8.45. Mehanički sistem prenosa korisnog momenta od motora do točkova

$$M_v = iM_m, \quad \omega_v = \frac{1}{i}\omega_m \quad (12.8.168)$$

Dobija se grafik:

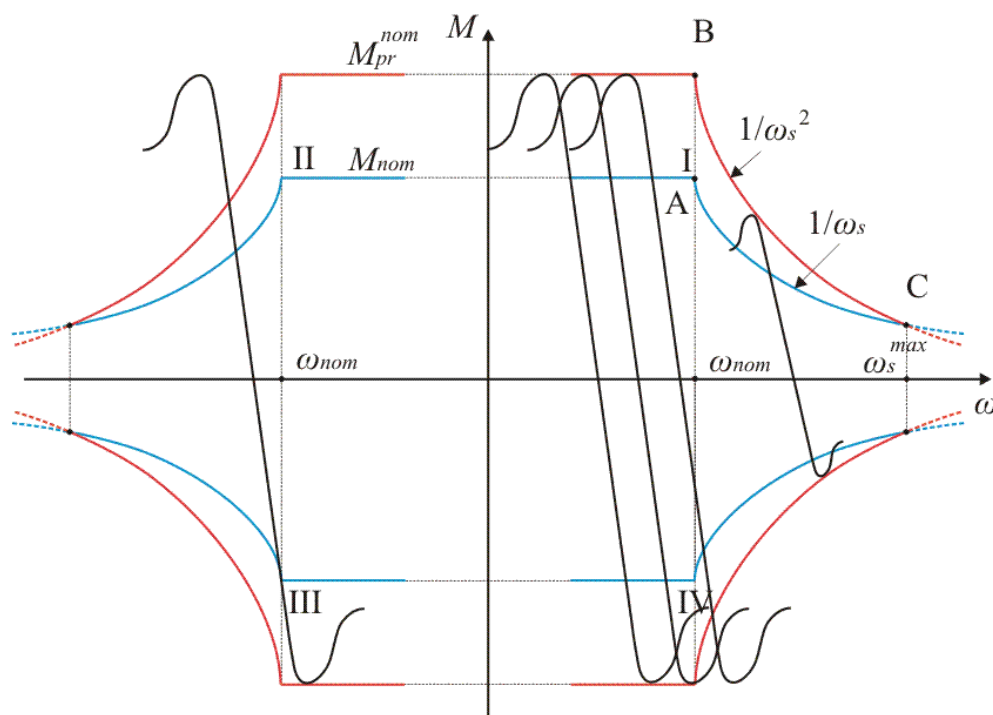


Slika br.13.8.46. Prikazana je ostvarena mehanička karakteristika SUS motora sa varijabilnim reduktorom radi održanja snage na konstantnoj vrednosti

Ovo se primenjuje u slučaju motora sa unutrašnjim sagorevanjem, a kod asinhronih motora se može izbeći. Reduktori se uvek pokušavaju izbeći jer predstavlja gubitak snage, dodatni deo koji se može pokvariti...

13.8.c.3 Eksploatacione i tranzijentne karakteristike AM

Sada će se videti kako izgledaju eksploatacione i tranzijentne karakteristike asinhronog motora.



Slika br.13.8.47. Eksploataciona i tranzijentna karakteristika za asinhroni motor

Menjanjem učestanosti napajanja karakteristika asinhronog motora se može translirati, pa je u radnoj tački koja pripada manjem pravougaoniku (označenog sa I, II, III i IV) moguć trajni rad. To znači da za svaku tačku u toj oblasti postoje napon statora i učestanost koji odgovaraju tom opterećenju i toj brzini. U radnoj tački koja pripada većem pravougaoniku moguć je samo rad u prelaznom (tranzijentnom) režimu. Eksploataciona karakteristika se ima za vrednost momenta od 0 do M_{nom} , a tranzijentna karakteristika za vrednost momenta od M_{nom} do M_{pr}^{max} . U tački A ima se ω_{nom} , M_{nom} i P_{nom} . U tački B je ω_{nom} i M_{pr}^{max} . Za tačku C važi: ω_s^{max} , $M_{nom} \frac{\omega_{nom}}{\omega_s^{max}}$ i P_{nom} . U tački C takođe važi:

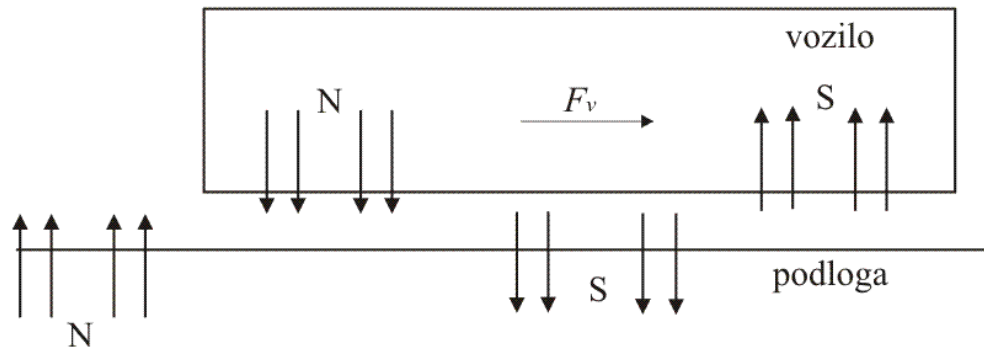
$$\omega_s^{\max} = \omega_{nom} \frac{M_{pr}^{nom}}{M_{nom}} \quad (12.8.169)$$

Preopteretljivost po momentu odgovara preopteretljivosti po brzini pa je maksimalna brzina rada u oblasti slabljenja polja onoliko veća od nominalne brzine koliko je M_{pr} veće od M_{nom} .

13.8.d Linearni indukcioni motor (LIM-Linear Induction Motor)

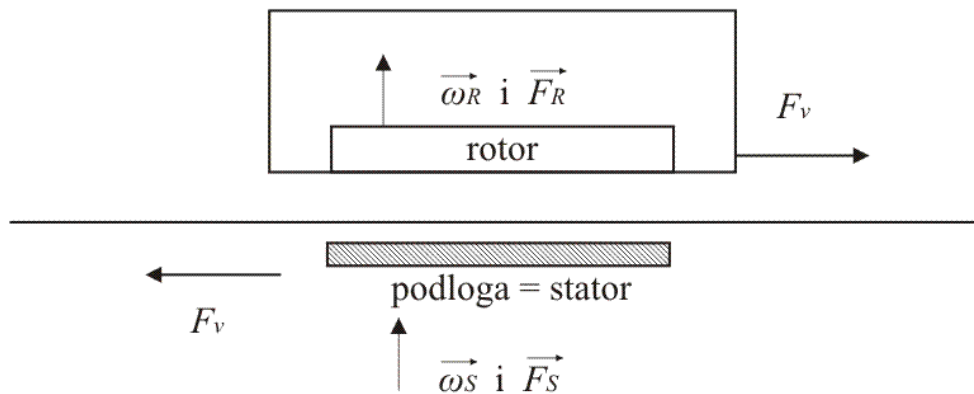
U savremenoj električnoj vuči koriste se linearni motori. Princip njihovog rada se ne razlikuje od asinhronog motora, samo kod linearnih motora ne postoje obrtni delovi već samo translatorno kretanje. Kod linearnog motora nema rotacionih delova, stator i rotor su jedan drugom paralelni. Za oslanjanje na podlogu se koristi magnetna levitacija, vazdušni jastuk ili točkovi koji nisu pogonski. Bilo koji od navedenih načina oslanjanja o podlogu da je u pitanju, jedno je sigurno, kod linearnih motora ne postoji problem adhezije. Odnosno nema ograničenja pogonskog momenta i vučne sile. To je bio i najveći problem kod konvencionalne železnice jer nam je trasa uslovljavala snagu koju možemo iskoristiti iz vučnih motora. Ovde nema proklizavanja.

Princip rada linearnog motora se može jednostavno objasniti. Neka vozilo predstavlja jedan magnet. Ako smo u situaciji da u podlozi, na kojoj leži vozilo, stvorimo magnetno polje tako da su istoimeni polovi vozila i podloge malo pomereni u pravcu kretanja (kao na slici br.13.8.48) na vozilo će delovati vučna sila. Ta sila želi da pokrene vozilo tako da se raznoimeni polovi poklope. To nije magnetsko lebdenje. Potrebno je imati dodatne polove u vozilu i podlozi koji bi konstantno bili postavljeni tako da su istoimeni polovi naspramni što bi rezultovalo odbojnom silom, lebdenjem vozila.



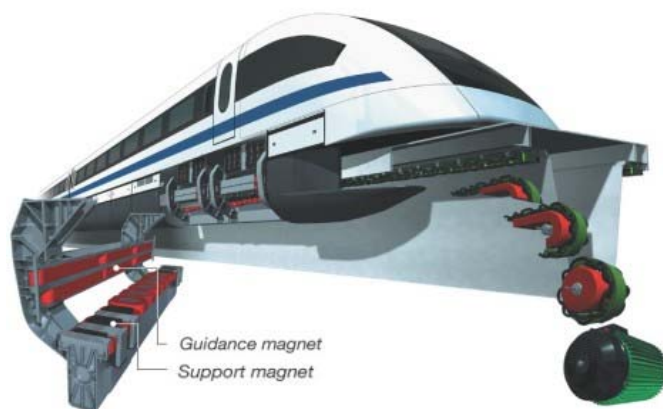
Slika br.13.8.48. Princip “putujućeg” polja kao osnova rada linearnih motora

Slučaj kada se kao stator koristi podloga prikazan je na slici:



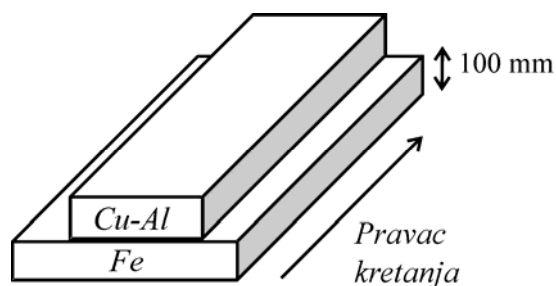
Slika br.13.8.49.

Za realizaciju linearnog motora pogodan je samo asinhroni motor sa kratko spojenim kaveznim rotorskim namotajem. Kratko spojeni kavez se može simulirati i ugraditi u podlogu. Na slici je dat primer kako se linearni motor, koji se koristi u modernoj železnici, može predstaviti pomoću rotacionog asinhronog motora.

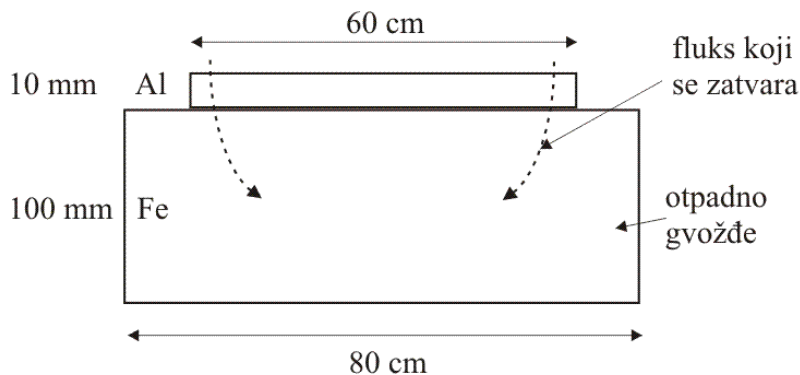


Slika br.13.8.50. Linearni motor se može prikazati kao asinhroni koji je razvijen u jednu traku. (obim postaje dužina)

Ukoliko bi postojala provodna gvozdена podloga po sredini pruge prekrivena aluminijumom, bio bi to rotor za asinhroni motor (na gornjoj slici crvena boja), a stator bi mogao da se postavi na dno vagona (na gornjoj slici zelena boja), tj. vozila. Uprošćeno, to se može videti na sledećim slikama:



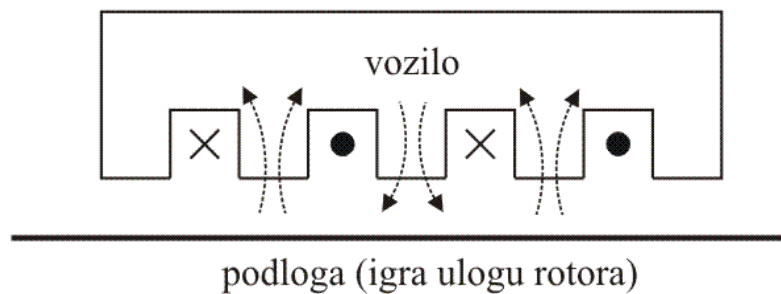
Slika br.13.8.51. Podloga linearnog motora ima analognu konstrukciju kaveznom rotoru asinhronog motora



Slika br.13.8.52. Poprečni presek podloge linearnog motora

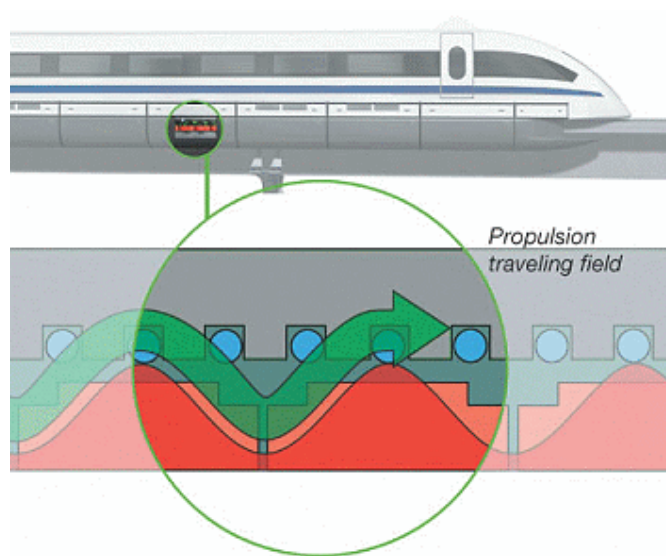
Sloj aluminijuma ima ulogu provodnika, dok gvožđe predstavlja feromagnetni materijal. Kako, prilikom primene linearnih motora u železnici, podloga predstavlja prugu, često se radi ekonomske isplativosti uzima gvožđe nižeg kvaliteta.

Uprošćen izgled vozila sa linearnim motorom, dat na slici, igra ulogu statora. Namotaji statora su smešteni u pod vozila tako da stvaraju putujuće magnetno polje.



Slika br.13.8.53. Uprošćen izgled vozila sa linearnim motorom

U podlozi se indukuju struje koje su suprotnog znaka i stvaraju polje suprotnog smera. Kao i kod AM, polje rotora, koje je indukovano poljem statora, uvek kasni za njim. Sila koja se javlja da se ta dva polja poravnaju, predstavlja vučnu silu. Na slici br.13.8.54 vidi se pokretačko naizmenično (“putujuće”) polje.



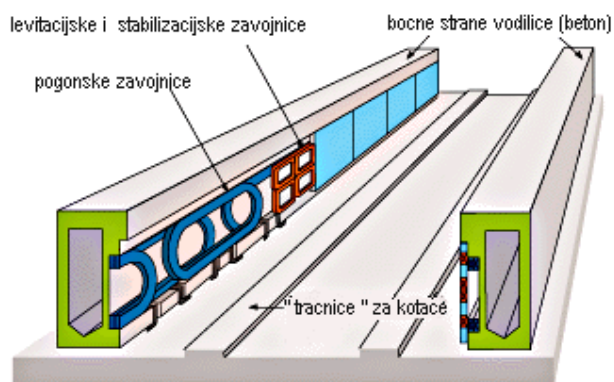
Slika br.13.8.54. Ilustracija putujućeg magnetnog polja koje obezbeđuje pogonsku (vučnu) silu

Magnetno polje se ne koristi samo za ostvarivanje vučne sile već i za postizanje efekta levitacije. Namotaji koji služe za ostvarivanje lebdjenja su postavljeni sa bokova vozila. Takođe se sa obe strane stavljaju i dodatni namotaji koji vode računa da vozilo ostane na putanji. Na slici br.13.8.55 se vidi deo “pruge” , namotaji za magnetnu levitaciju i namotaji sa bočnih strana za održavanje vozila na određenom pravcu.



Slika br.13.8.55. Sistem namotaja koji omogućava magnetno lebdjenje vozila

Ovo nije jedino rešenje za oslonac o pologu kod vozila sa linearnim motorima. Postoje rešenja vučnih sistema koji umesto magnetne levitacije, kontakt sa podlogom ostvaruju pomoću točkova, dok se vučna sila takođe ostvaruje linearnim motorom na već objašnjen način. Primer “pruge” za takvo rešenje je prikazan na sl br.13.8.56.



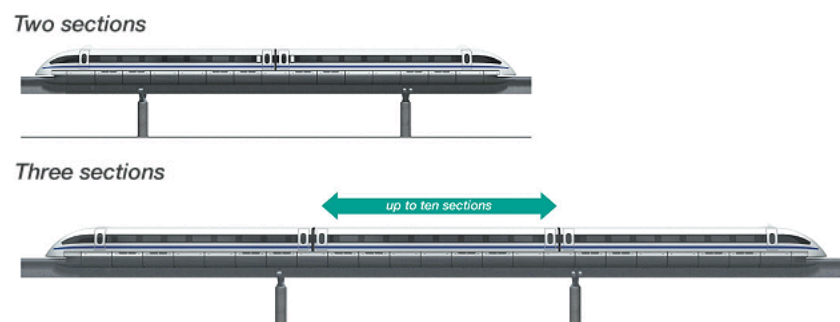
Slika br.13.8.56. Primer “pruge” za vozila koja kontakt sa podlogom ostvaruju putem točkova

U takvim sistemima su pogonski i stabilizacioni namotaji ugrađeni u beton sa bočnih strana “pruge”. Točkovi nisu pogonski i služe samo radi ostvarivanja kontakta sa podlogom. Za njih se prave u “prugama” putanje po kojima se oni kotrljaju.

Kako smo problem adhezije rešili linearnim motorom, proističe zaključak da ne postoji brzinsko ograničenje. U vozila možemo ugrađivati linearne motore veoma velikih snaga i, pod uslovom da se vlada materijalima koji mogu izdržati tolika naprezanja, svu tu snagu upotrebiti sa razvijanje vučne sile. Tako se maglev vozovi prave kao veoma brzi, dostižu i brzine od 500 km/h. Dominantan otpor kretanju je otpor vazduha. Iz tog razloga se velika pažnja poklanja aerodinamičnom obliku voza.

Pa, kada su performanse linearnih motora i maglev sistema toliko dobre, možemo li zaboraviti konvencijalno rešenje u železnici sa obrtnim motorima?

I ako su maglev sistemi u novije vreme u velikoj ekspanziji ne treba zaboraviti da linearni motori generalno rade sa niskim stepenom iskorišćenja. Razlog tome je veliki vazdušni prostor (zazor) između podloge (rotora) i vozila (statora). On je reda 10 mm pa naviše. Nizak stepen iskorišćenja nije jedini problem. Kod maglev sistema ne postoji vučno vozilo i vagoni koji nisu pogonski. Da bi voz uopšte mogao da ostvari dovoljnu vučnu silu da se pokrene linearni motor (stator) se mora ugraditi u podove svih vagona. To je u suštini jedna velika lokomotiva. Svaki vagon učestvuje u stvaranju pogonske sile.



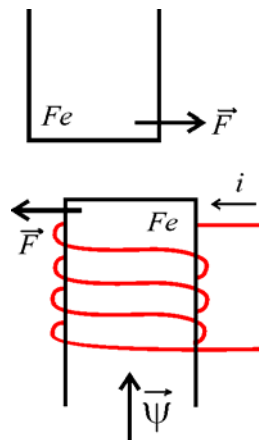
Slika br.13.8.57. Kod vozila sa linearnim motorima sva kola učestvuju u stvaranju vučne sile

Zbog velikih brzina, krivine “pruga” moraju biti blage, jer bi voz pri brzini od 500km/h koji je izleteo izvan “pruge” predstavljao metak od par desetina tona. Inženjeri uglavnom izbegavaju tunele radi velike promene pritiska pri prolasku voza velikom brzinom. Stvara se veliki prasak i buka.

13.8.e Prekidački reluktantni motori (SR motori -Switched Reluctance Motor)

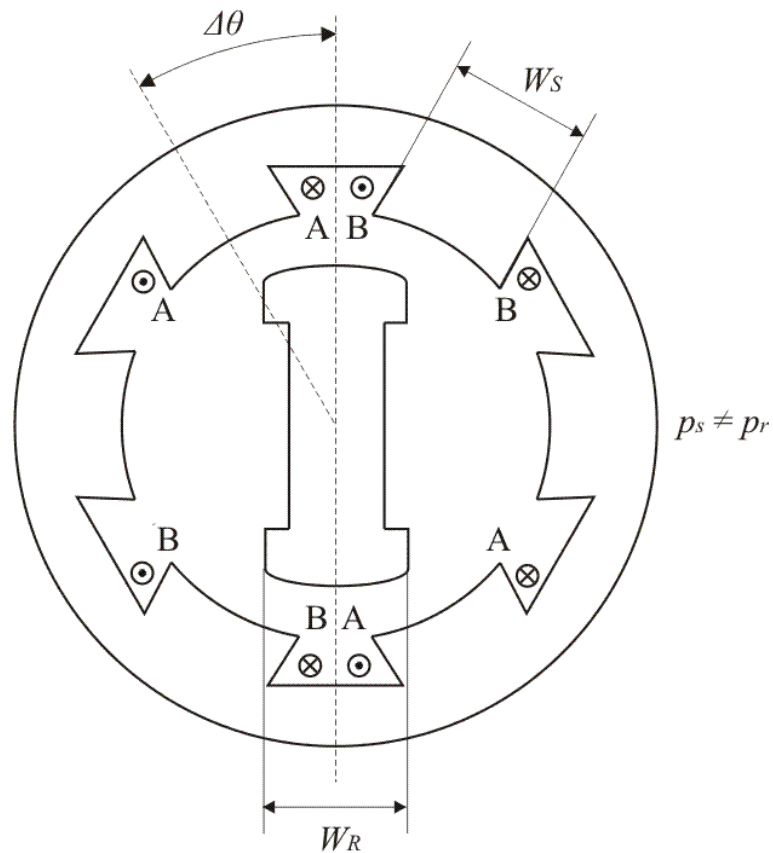
Struktura ovih motora je vrlo jednostavna. Namotaji se nalaze samo na statoru i nisu raspoređeni po žlebovima već su koncentrisani. Rotor je od fino oblikovanog, laminiranog feromagnetika.

Ovi motori ne rade na principu obrtnog magnetnog polja već na principu varijabilne reluktanse. Postoji težnja da se pol rotora dovede u položaj minimalne reluktanse. Na sledećem primeru vidi se kako se pod dejstvom sile dva prikazana elementa u datim okolnostima pokreću jedan u odnosu na drugi. Ta sila, koja je srazmerna kvadratu fluksa magnetnog polja, teži da ih dovede u položaj minimalne magnetne otpornosti $R_{\mu} \rightarrow R_{\mu}^{min}$.



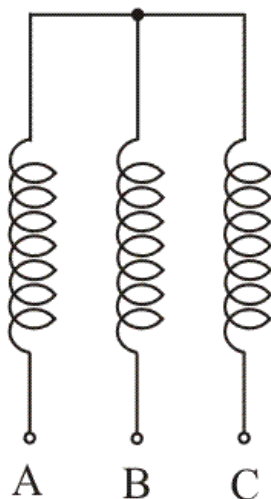
Slika br.13.8.58. Ilustracija sile koja se javlja kao posledica polja da smanji magnetni otpor

Broj pari statorskih polova nije isti kao broj pari rotorskih polova. U praksi su moguće kombinacije šest statorskih i četiri rotorska pola, a na sledećoj slici dat je prikaz slučaja u kome postoji šest statorskih i dva rotorska pola:



Slika br.13.8.59. Poprečni presek SR motora

Par naspramnih polova sadrži namotaje jedne faze. Ovo je trofazni motor, sa trofaznim namotom na statoru kao na slici:

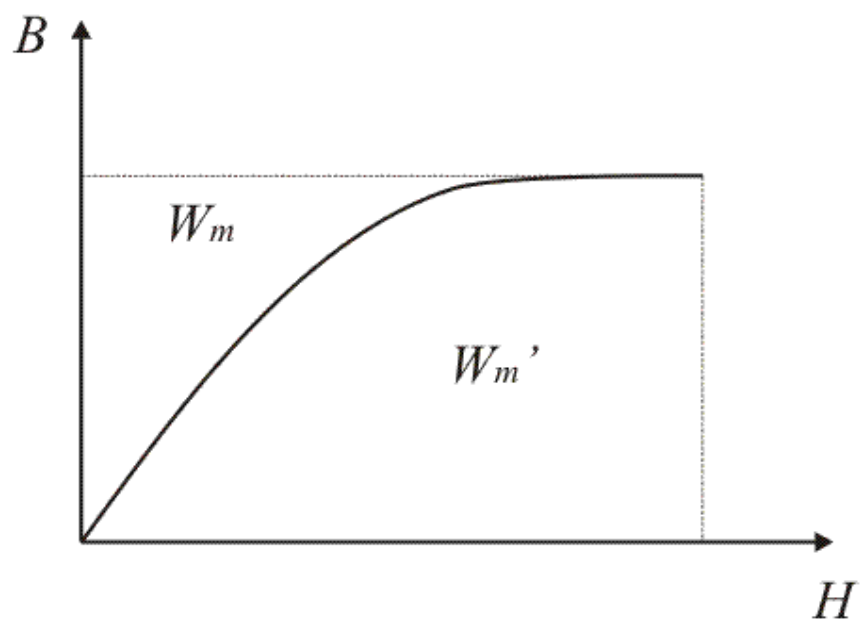


Slika br.13.8.60. Trofazni namotaj SR motora

Rotorski pol teži da se približi eksitovanom statorskom polu.

Magnetno kolo je nelinearni. Najteže je izračunati momenat.

Ako je sistem bez izvora, za rad se mora koristiti energija polja. Zavisnost indukcije od magnetnog polja je data na slici:



Slika br.13.8.61. Energija sadržana u polju se može izračunati kao površina ispod krive magnećenja

Momenat koji se razvije biće pri konstantnom fluksu:

$$M = - \frac{\partial W_m}{\partial \theta} \quad (12.8.170)$$

W_m je magnetna energija:

$$W_m = \int_V \left(\int_0^B H dB \right) dV \quad (12.8.171)$$

Integraljenje se vrši po celom prostoru, tj. po celoj zapremini.

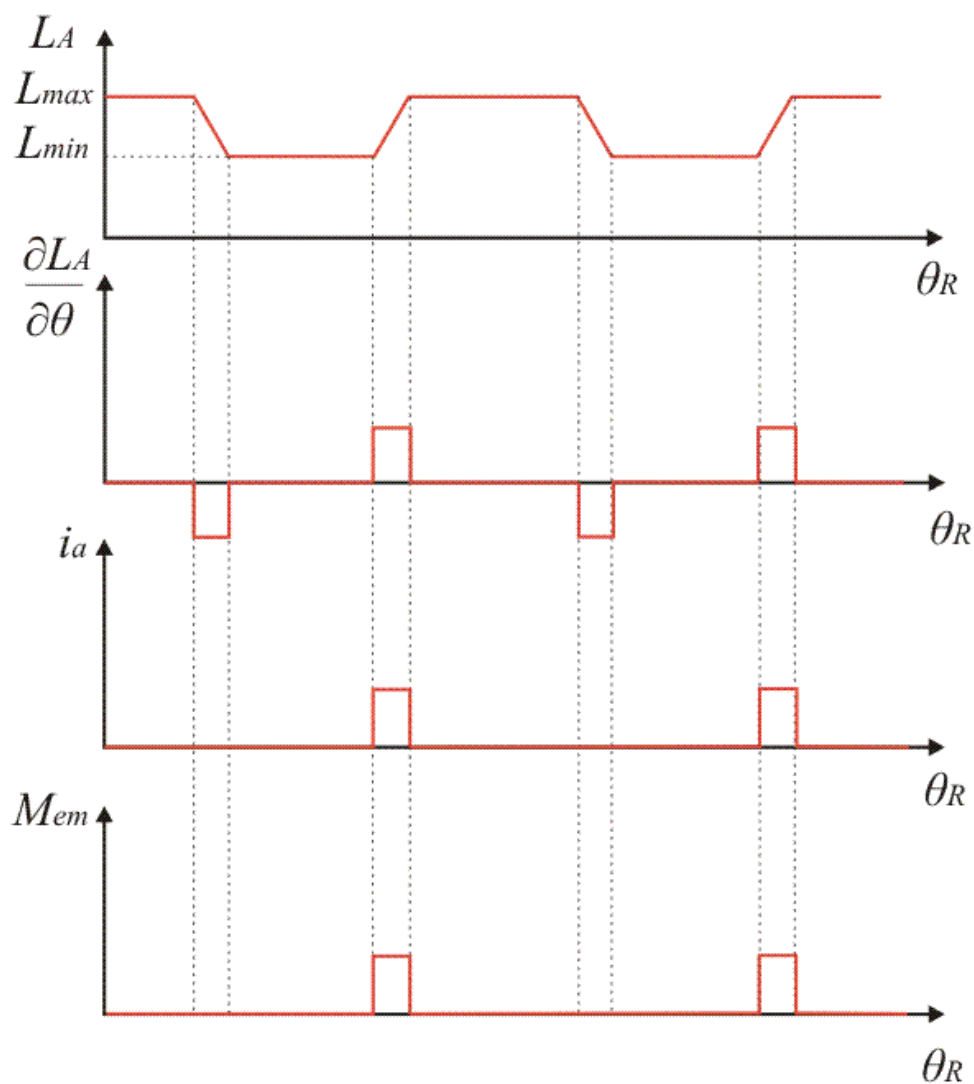
Ako se mašina napaja konstantnom strujom, $i = \text{const.}$, tada će momenat biti:

$$M = \frac{\partial W'_m}{\partial \theta} \quad (12.8.172)$$

W'_m je koenergija:

$$W'_m = \int_V \left(\int_0^H B dH \right) dV \quad (12.8.173)$$

Ako je poznata struja i induktivnost u fazi A , uzimajući u obzir da ova induktivnost zavisi od prostornog položaja, odnosno od ugla između ose faze A i ose rotora, dobijaju se sledeći grafici:



Slika br.13.8.62. Zavisnosti veličina od interesa od prostornog (obimnog) ugla

Momenat od faze A je srazmeran:

$$M_{em}^A \sim \frac{1}{2} i_A^2 \frac{\partial L_A}{\partial \theta} \quad (12.8.174)$$

Induktivnost je:

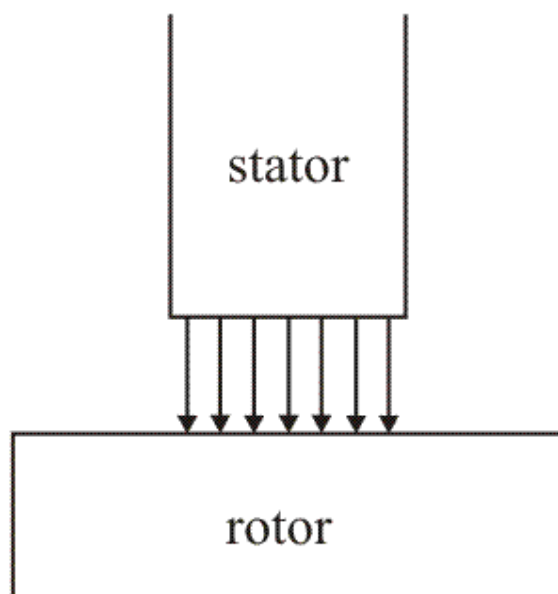
$$L_A = \frac{N_A^2}{R_\mu} \quad (12.8.175)$$

R_μ je magnetna otpornost:

$$R_\mu = \frac{1}{\mu_0} \frac{\delta}{S} \quad (12.8.176)$$

gde je δ dužina zazora, a S je površina kroz koju prodiru linije fluksa.

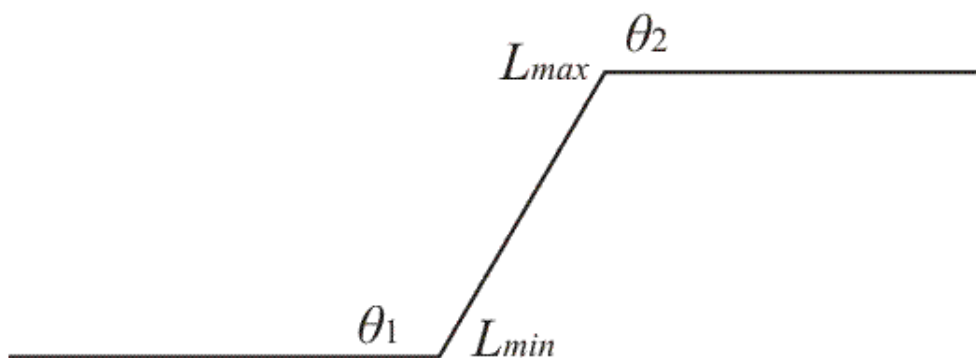
Obično je pol rotora širi od pola statora:



Slika br.13.8.63. Pol rotora je širi od pola statora

Kada se rotor i stator poklapaju ugao θ je jednak 0 ili π i postoji margina gde je L_A konstantno i neće se prouzrokovati promene u površi kroz koju prolaze linije fluksa. Slično važi i za minimalnu vrednost induktivnosti, odnosno kada se rotor potpuno izmakne ispod statora, kao što se vidi na graficima.

Vrednost momenta proporcionalna je strmini L_A i on je posledica delovanja struje u fazi A :



Slika br.13.8.64. Promena induktivnosti sa uglom

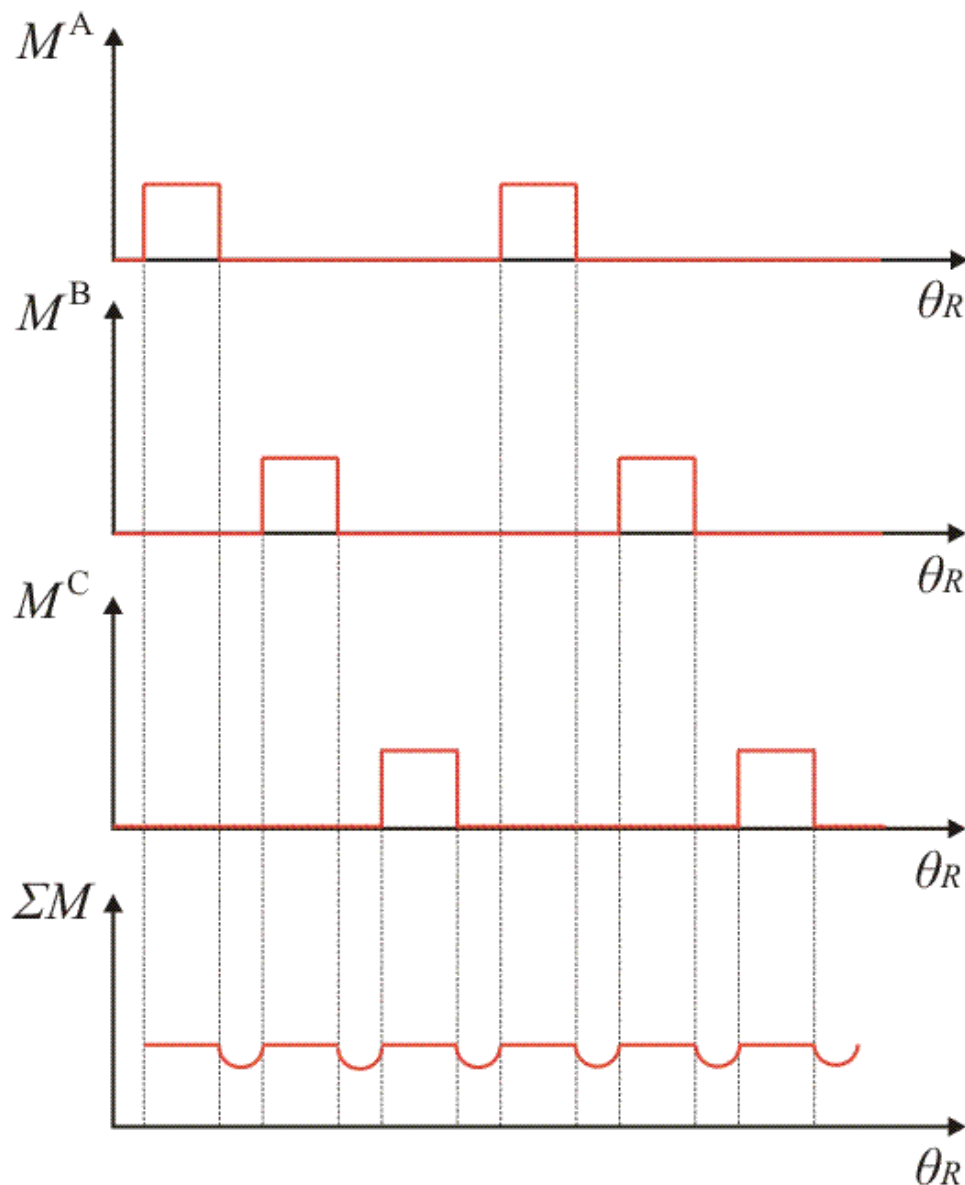
$$M_{sr} = \frac{1}{\theta_1 \cdot \theta_2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} M(\theta) d\theta \Rightarrow M_{sr} \sim (L_{\max} - L_{\min}) \quad (12.8.177)$$

Uslov postojanja momenta u svakoj tački:

$$\frac{2W_s}{\pi D} \geq \frac{1}{n} \quad (12.8.178)$$

gde je n broj faza, W_s je širina statorskog pola, a D je prečnik.

Ako se želi rad u motornom režimu, napajanje i_A izgledaće kao na grafiku. Struje će biti samo onda kada L_A ima uzlaznu ivicu, imaće se samo pozitivan momenat. Ako se na način na koji se napaja fazni namotaj A napajaju i namotaji B i C sa međusobnim pomerajem, ukupni momenat će da bude zbir parcijalnih momenata ove tri faze:



Slika br.13.8.65. Momenti pojedinih faza i ukupni moment u zavisnosti od ugla

$L(\theta)$ za pojedine faze pomereno je za 60° .

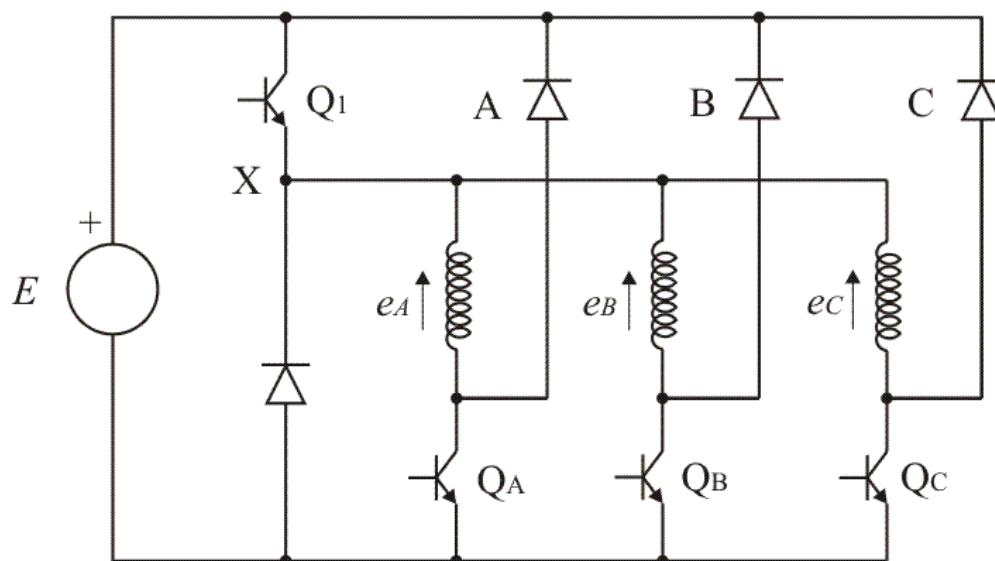
Da bi se u svakom položaju ovaj motor mogao pokrenuti potrebno je da broj polova statora i broj polova rotora i njihova širina budu takvi da za bilo koji položaj rotora postoji bar jedna faza u kojoj $L(\theta)$ ima uzlazni oblik.

Rad ove mašine u generatorskom i motornom režimu nije vezan za smer struje jer je $M \sim i^2$. Motor ima pozitivan momenat ako strujni impulsi u svakoj fazi koincidiraju sa

uzlaznom ivicom induktivnosti, i obrnuto, negativan momenat, promenom pozicije strujnog impulsa kada induktivnost ima silaznu ivicu. Iz ovoga sledi da je moguće unipolarno napajanje.

13.8.e.1 Pretvarač za napajanje SR motora

Šema ovog pretvarača data je na slici:



Slika br.13.8.66. Pretvarač za napajanje SR motora

Pretvarač je veoma jednostavan. Napon u tački X reguliše se tranzistorom Q_1 primenom impulsno širinske modulacije i može se menjati od 0 do E . Ako je struja i_A konstantna

$$\psi_A = L_A \cdot i_A$$

Nema međusobnog uticaja faza.

$$e_A = \frac{d\psi}{dt} = \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial L_A}{\partial \theta} i_A \omega_R \quad (12.8.179)$$

e_A treba balansirati sa U_X . Proticanje struje moguće je samo u jednom smeru kroz namotaj.

Ovaj motor nije opasan u slučaju bilo kakve havarije. Obrtanjem rotora ne indukuje se nikakva *ems* u namotajima. Njegova primena u električnoj vuči sve je više zastupljena.

Talasnost elektromagnetnog momenta predstavlja nedostatak SR motora. Kod realnog motora oscilacije momenta su od blizu nule do nominalne vrednosti momenta.

Zajednička osobina svih jednostrano napajanih mašina je da momenat zavisi od kvadrata fluksa:

$$M \sim i^2 \sim \psi^2 \quad (12.8.180)$$

U oblasti slabljenja polja nije moguć rad. Što je veća brzina rotora, maksimalan fluks opada sa porastom brzine, a maksimalni momenat opada sa kvadratom brzine.

Dobra osobina ove vrste motora je jednostavnost i niža cena u odnosu na druge vrste. Dimenzije su, takođe, manje: njegov gabarit je 30% do 40% manji od ekvivalentnih asinhronih ili sinhronih mašina.

14 Dizel-elektične lokomotive

Dizel-električna vuča koristi se u saobraćaju tamo gde to uslovi dozvoljavaju i gde je to neophodno. Više činilaca utiču na to da se odabere ovaj vid transporta.

Poznato je da se na lokalnim linijama ne isplati raditi elektrifikaciju. U takvim slučajevima se koriste dizel lokomotive i obično su to pruge velike dužine ali malog saobraćaja.

Dizel lokomotiva je autonomna, tj. nosi svoj rezervoar energije, odnosno nije potrebna kontaktna mreža niti elektrovučne podstanice.

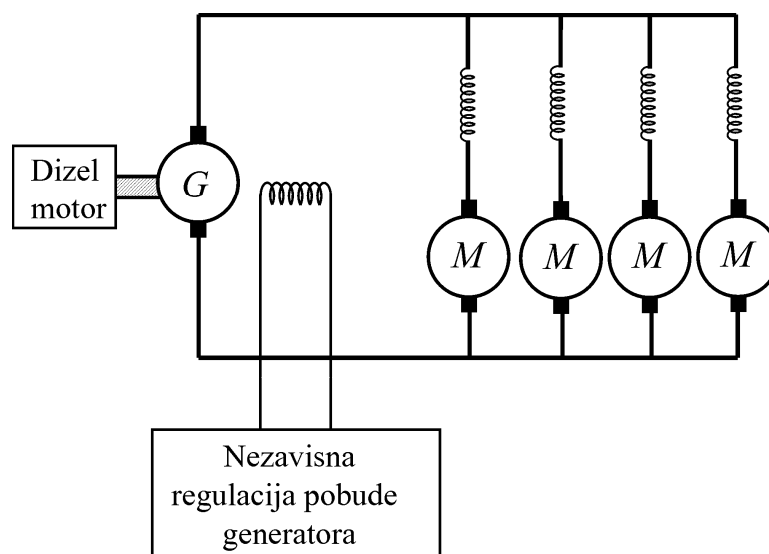
Dizel-električne lokomotive se mnogo koriste u Severnoj Americi gde je nafta jeftina i slab saobraćaj.

Ove lokomotive koriste se u manevarskoj službi na ranžirnim stanicama, a i kao površinske lokomotive u rudnicima.

Sa druge strane, troškovi održavanja dizel-električnih lokomotiva su veći od troškova održavanja električnih lokomotiva, čiji je vek trajanja (30 do 40 godina) dva puta veći od veka trajanja dizel lokomotiva.

Snaga dizel-električne lokomotive je približno dva puta manja od snage električne lokomotive pri istoj težini.

Na narednoj slici vidimo šematski prikaz dizel motora, koji pokreće generator jednosmerne struje sa nezavisnom regulacijom pobude. Ovaj generator napaja vučne motore, koji pokreću osovine.

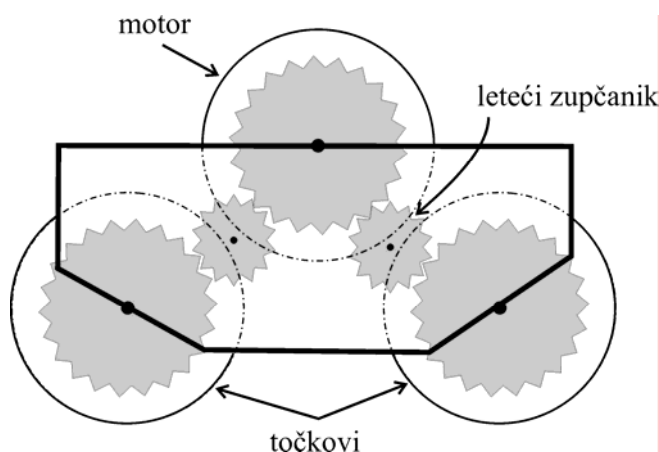


Slika br.14.1. Princip napajanja električnih motora u dizel lokomotivama

Postoji tendencija da motori budu istog tipa, kao i na električnoj lokomotivi zbog potrebe održavanja, pa postoje identična obrtna postolja:

- monomotorno
- dvomotorno

Obrtno postolje objedinjuje dve pogonske osovine i motor. Ako jedan motor pogoni dve osovine, kao na narednoj slici, onda je to monomotorno obrtno postolje, a ako dva motora pogone dve osovine onda je to dvomotorno obrtno postolje. Monomotorno se više koristi zbog boljeg iskorišćenja adhezije.



Slika br.14.2. Prenos momenta motora na dve osovine

Postolje se realizuje kao obrtno da bi u krivinama moglo da rotira:



Slika br.14.3

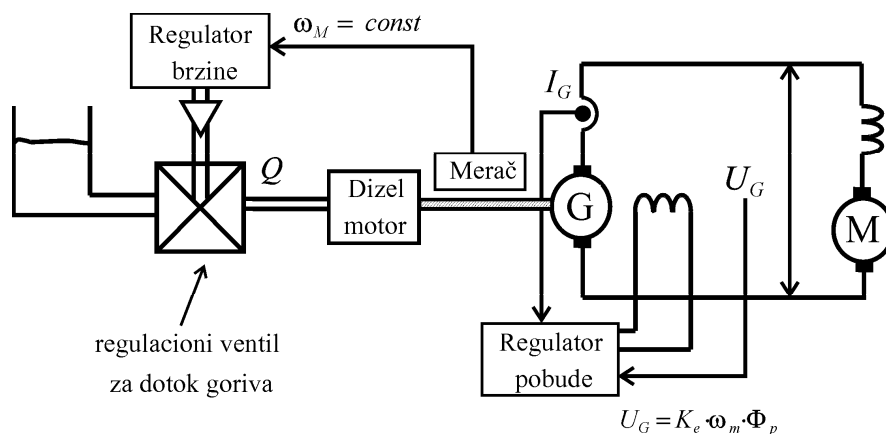
Dizel motor je motor sa unutrašnjim sagorevanjem. Momenat koji on razvija zavisi od rada proizvedenog u svakom cilindru. Rad svakog cilindra je konstantan. Motor ima praktično konstantan momenat, njegova promena je u zavisnosti od brzine obrtanja vrlo mala. Snaga motora je proporcionalna brzini. Snaga se povećava povećanjem brzine. Brzina motora je ograničena mehaničkom otpornošću delova i zagrevanjem. Počevši od neke određene brzine, voda za hlađenje ne može da evakuiše toplotu sa

zidova cilindara. Ta brzina je granična brzina i ona određuje maksimalnu snagu ili tzv. putnu snagu dizel motora.

Poznato je da momenat motora za vuču mora pri polasku da bude 1,5 do 2 puta veći od nominalnog momenta. Nakon završetka ubrzanja, gubi se potreba za ovako velikim momentom. Njegova vrednost se svodi na vrednost potrebnu za savlađivanje stalnih otpora vuče, tj. za održavanje putne brzine. Zbog ovih razloga sam dizel motor ne odgovara zahtevima vuče. Za poboljšanje mehaničkog prenosa između motora i motorne osovine koristi se menjač, koji omogućuje više stepena prenosa, ali ni ovaj način u potpunosti ne zadovoljava sve potrebe. Samo kvačilo (frikciona spojnica) troši 10 do 20% snage pri polasku, što, naravno, nije praktično (npr. pri potrošnji od 2MW na kvačilo ide najmanje 200kW, što je mnogo). Pokazalo se da je najbolje rešenje električni prenos u dizel-električnoj vuči. Pored više prednosti ovog rešenja u pogledu montaže, održavanja i praktičnog izvođenja, dizel-električni prenos omogućava kontinualnu regulaciju vučne sile na obodima točkova u zavisnosti od brzine, tako da se skoro uvek koristi puna snaga dizel-motora.

Rekuperativno kočenje nije moguće, što je samo po sebi jasno.

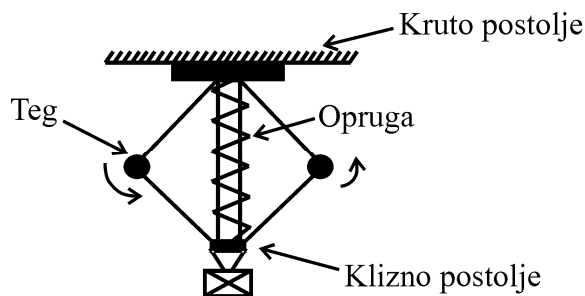
Povećanje snage lokomotive postiže se povećanjem napona glavnog generatora. Pobudna struja generatora i brzina obrtanja dizel motora su dve upravljačke varijable koje mogu da upravljaju naponom. Da bi dizel motor, kao motor sa unutrašnjim sagorevanjem, bio optimalno iskorišćen, treba da radi pri nominalnim brzinama, jer pri malim brzinama ima problema sa podmazivanjem i sagorevanjem. Regulator pobude mora biti takav da eliminiše preopterećenje zbog problema hlađenja zidova cilindara. Šematski prikaz sistema za regulaciju dat je na slici:



Slika br.14.4. Sistem regulacije brzine dizel agregata

Regulatorom brzine dizel motora reguliše se količina goriva dizel motora. Njegova uloga je da onemogući svako povećanje brzine pri smanjenju snage na obodu točkova lokomotive, odnosno da smanji brzinu u slučaju povećanja snage. Regulator brzine može biti:

a) centrifugalni, koji je prikazan na sledećoj slici;



Slika br.14.5. Centrifugalni regulator brzine

Karakteristike su mu da je pouzdan, a sastoji se od tegova koji rotiraju ugaonom brzinom ω_M , ili nekom proporcionalnom brzinom, pri čemu je uspostavljena ravnoteža sa oprugom. Tegovi su povezani sa delom koji određuje dotok goriva.

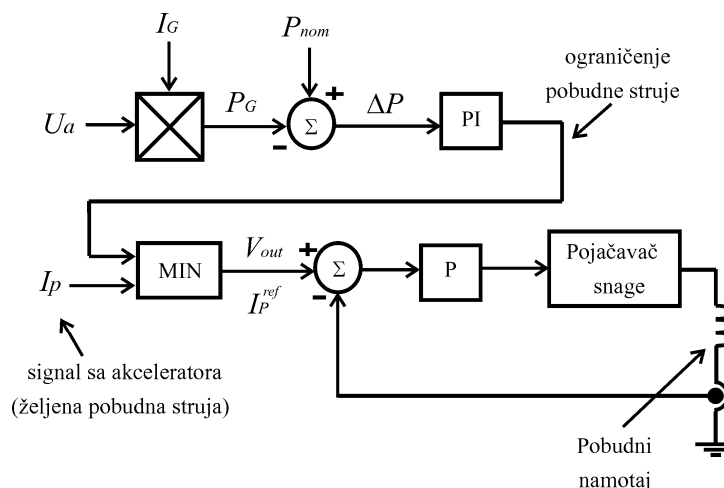
b) digitalni.

Preko impulsnog davača se meri ω_M pa preko kola za upravljanje se komanduje elektronskom ventilu za dotok goriva.

Regulator pobudne struje generatora, koji je prikazan na narednoj slici, ostvaruje sledeću akciju:

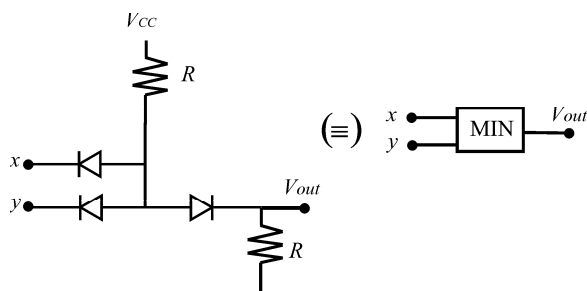
$$I_p \uparrow \Rightarrow \phi_p \uparrow \Rightarrow U_G \uparrow \Rightarrow U_M \uparrow \Rightarrow I_M \uparrow \Rightarrow M_M \uparrow \Rightarrow F_v \uparrow \quad (12.8.181)$$

i obrnuto. U ovakvoj regulaciji, pobudna struja ima funkciju "pedale za gas".



Slika br.14.6. Blok šema regulacije brzine

Na sledećoj slici je data uprošćena električna šema koja realizuje funkciju $\min(x,y)$:



Slika br.14.7. Uprošćena električna šema koja realizuje funkciju $\min(x,y)$:

Pored generatora, na osovinu dizel motora priključen je i trofazni alternator (snage 120 do 150kW) i njegov zadatak je napajanje pomoćnih uređaja u lokomotivi i vagonima.

Za mašine, u našem slučaju za generatore, jednosmerne struje postoji jedno konstruktivno ograničenje. Glavni problem ovih mašina je komutacija koja je

zadovoljavajuća ako *ampernavojci* po *cm* i napon između lamela ne prelaze određene granice. Kada se ove granice dostignu, povećanje snage se može postići jedino povećanjem prečnika mašine. Granična snaga je proporcionalna prečniku, i vodeći računa o maksimalno dozvoljenoj perifernoj brzini obrnuto je proporcionalna brzini rotacije. Znači, postoji granica proizvoda snage i brzine koja se naziva faktor Pn . On je praktično reda $Pn=1000MW\ ob/min$.

Veličina mašine je proporcionalna momentu. Niskobrzinska mašina ima veći momenat pa je i veća po dimenzijama i masi, što može da bude problematično, i njeno korišćenje kao rešenje za povećanje snage lokomotive teško zadovoljava. Tu bi postojao npr. sledeći slučaj: 3000 ob. dizel motora ide na reduktor i dalje se prenosi 300 ob. na generator. Prisutan je veliki stepen redukcije i sve je jako komplikovano. Drugo rešenje je u primeni dva generatora jednosmerne struje za jedan dizel motor sa direktnim sprezanjem. I ovo rešenje je komplikovano i ne zadovoljava u potpunosti (težina je velika).

Tendencija je da se koriste alternatori (sinhroni generatori) sa transformacijom na lokomotivi naizmenične struje u jednosmernu. Korišćenjem alternatora pravi se ušteda u pogledu mase i cene, jer je cena po *1kg* mase alternatora niža od odgovarajuće cene generatora jednosmerne struje. Alternatori nemaju Pn ograničenje. Primena generatora naizmenične struje je još uvek u eksperimentalnoj fazi.

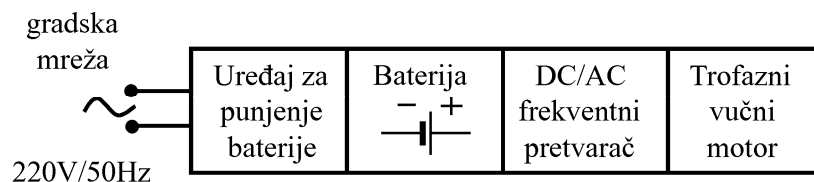
15 Električni i hibridni automobili

Odavno postoji težnja da se naprave automobili na električni pogon. Time bi se u velikoj meri rešio ekološki problem, koji je značajno uzrokovan hemijski štetnim gasovima, a koje kao proizvod sagorevanja pogonskog goriva ispuštaju motori sa unutrašnjim sagorevanjem.

Osnovni problem koji se javlja kod ovih vrsta automobila je težina baterije: za auto tipa "Yugo" (do 1000kg) za 100km puta potrebna je baterija od oko 400kg.

Razvoj u ovoj oblasti se deli na dve grane:

- električni automobili (principska blok šema je prikazana na narednoj slici). Ovakav automobil je jednostavan i nema zagađenja, ali su mu performanse loše: za bateriju od 400kg, maksimalna brzina je 60 do 70km/h, a radijus je do 80km.

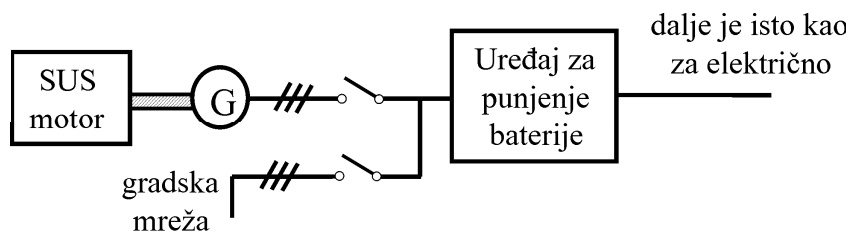


Slika br.15.1. Sistem napajanja električnog motora u automobilu

Zbog ovih loših osobina teži se razvoju i drugog tipa motora.

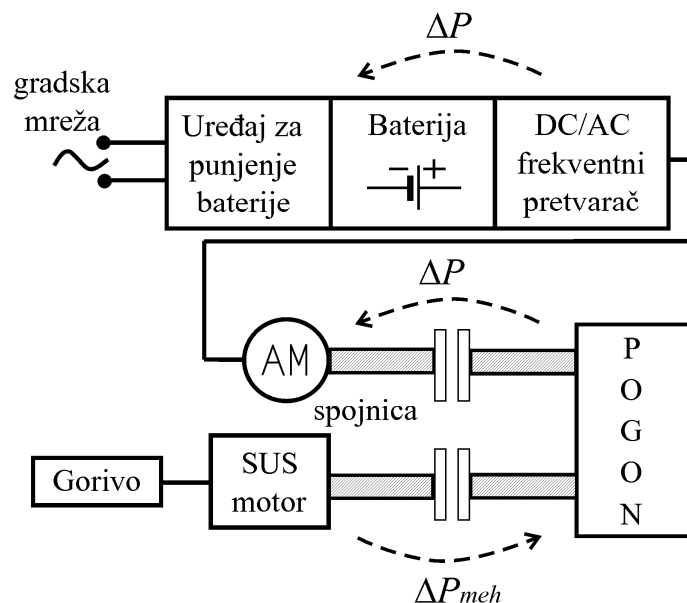
- hibridni

Ovi se dele na serijske (principska blok šema je prikazana na narednoj slici)



Slika br.15.2. Hibridni koncept (serijski)

i paralelne (principska šema je prikazana na narednoj slici).



Slika br.15.3. Hibridni koncept (paralelni)

U obe realizacije postoji električni pogon i motor sa unutrašnjim sagorevanjem. Serijsku realizaciju nazivamo tako jer se energija goriva pretvara u mehaničku (posredstvom *sus* motora) pa u električnu (u generatoru), i dalje u vučnu silu.

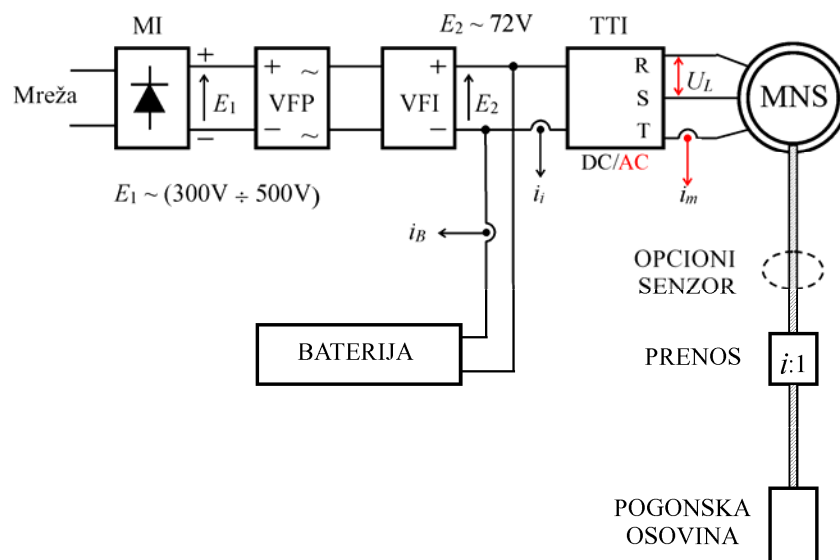
Paralelna realizacija poseduje mehaničku spregu između *SUS* motora i pogona. Prisustvo mehaničke spojnice ugrožava pouzdanost i sigurnost rada. Ovde se može istovremeno crpeti energija iz dva izvora pa vršna snaga može biti mnogo veća.

Ovde postoji mogućnost da se baterije dopunjavaju u toku autonomne vožnje: kada iz *sus* motora saopštavamo P_{meh} , tada *AM* može da radi kao generator i da dopunjava bateriju ($P_{meh} = P_v + \Delta P$ gde ΔP ide nazad kroz *AM* koji radi u generatorskom režimu, pri čemu je bitno da učestanost napona *AM* bude manja od učestanosti rotora).

SUS motori koji se koriste kod ovih realizacija najmanje zagađuju okolinu, i to naročito pri optimalnom radu, što se može podesiti (pogotovu kod serijskog). Tada je i iskorišćenje goriva bolje.

15.1 Električna šema pogonskog sistema električnog automobila

Električna šema data je na slici:



Slika br.15.1.1. Električna šema pogonskog sistema električnog automobila

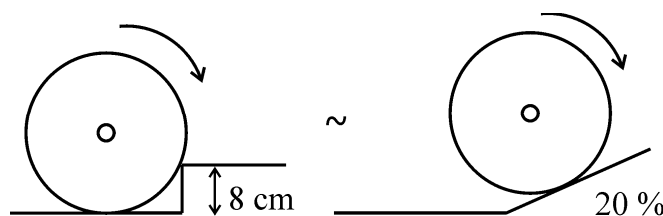
Legenda:

- Mrežni ispravljač (MI)
- Visokofrekventni DC/AC pretvarač (VFP)
- Ispravljački stepen VFP-a (VFI)
- Akumulatorska baterija 72V (120Ah):
 - Olovna ($m \sim 380\text{ kg}$)
 - NiCd ($m \sim 220\text{ kg}$)
 - Litijum metal hibrid ($m \sim 145\text{ kg}$)
- Trofazni tranzistorski inverter (TTI)
- Motor naizmenične struje (MNS):
 - Asinhroni motor (AM)
 - Sinhroni motor (SM)
- Senzor (opciono):
 - Tahogenerator
 - Enkoder

- Komplet magnetnih prekidača
- Mehanički reduktor
- Pogonska osovina.

Otpori kretanja ovog automobila pri brzini od 60km/h su uglavnom otpori vazduha. Kako je $G \sim 0,8t$, pri brzini $v = 80\text{km/h}$ ukupna snaga P_V se kreće približno 5,5 do $7,5\text{kW}$.

Propisi predviđaju da vozilo mora da savlada ivičnjak visine 8cm (pogonski motor mora ostvariti određeni moment). Ovaj uslov se može interpretirati kao uslov da se savlada uspon od 20%.



Slika br.15.1.2

Na osnovu ovoga se može izračunati polazni moment i snaga električnog vozila:

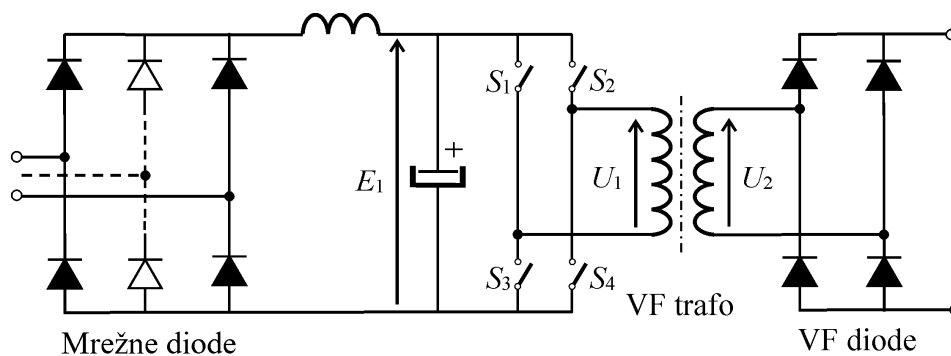
- četvoropolni motor ($p=2$) snage $7,5\text{kW}$ sa prenosnim odnosom $v=25\text{km/h}$, odakle sledi da je $\omega=150\text{rad/s}$, može da zadovolji ove zahteve.

$E_2=72V$ je napon jednosmernog međukola u kome se obezbeđuje snaga za napajanje baterije i kada vozilo miruje.

Date baterije omogućavaju radijus od 60km u gradskoj vožnji, ili 80 do 90km pri vožnji na otvorenom.

Postoji težnja da svi delovi automobila budu što je moguće lakši kako bi njegova nosivost bila što veća. Zbog toga postoje VFP i VFI.

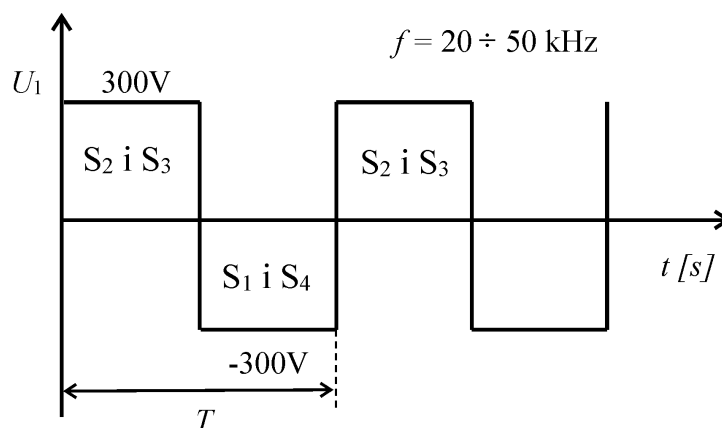
Takođe, ovakva konfiguracija pretvarača je potrebna zbog galvanske izolacije instalacije automobila od mrežnog napona.



Slika br.15.1.3.

Mrežne diode imaju veliko naelektrisanje prostornog tovara i veliko vreme isključenja (spore su). Za monofazni priključak na mrežu koriste se 4 diode, za trofazni 6 dioda.

VF trafo ima mali gabarit jer je učestanost na kojoj radi znatno viša od mrežne učestanosti. Talasni oblik napona na primaru:



Slika br.15.1.4.

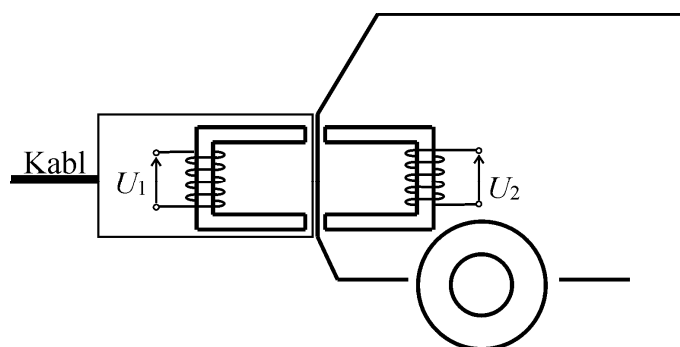
Transformator je ograničen strujom i fluksom. Snaga je UI , a napon $\Phi\omega$, pa je dimenzionirano:

$$P \sim \Phi\omega I. \quad (13.1.1)$$

Sledi, iz iste težine magnetnog kola, povećanjem ω može se dobiti veća preneti snaga P . To je razlog što se ide na visoke učestanosti ω .

Napon sekundara U_2 ima isti talasni oblik kao napon primara U_1 . Amplituda napona U_2 iznosi sedamdesetak volti.

Realizacija "bezkontaktnog punjenja" (na gornjoj šemi predstavljeno linijom "crt – tačka"):



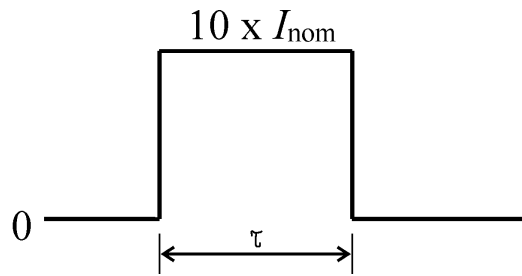
Slika br.15.1.5. Princip bezkontaktnog punjenja baterija

Problem koji se javlja je punjenje baterije koja je hemijski izvor. Obično one mogu podneti od 300 do 1500 ciklusa punjenja i pražnjenja. Život baterije zavisi i od toga kako se ona puni. Ako se prepuni (napon 100%), dolazi do ključanja i sulfatizacije elektrolita čime se skraćuje radni vek baterije.

Postoje dve vrste punjača:

- Jednofazni: obezbeđuju spori proces punjenja (7 do 10 sati).
- Trofazni: obezbeđuju veću snagu pa je vreme punjenja kraće (1,5 do 2 sata).

Punjenje se vrši impulsno:

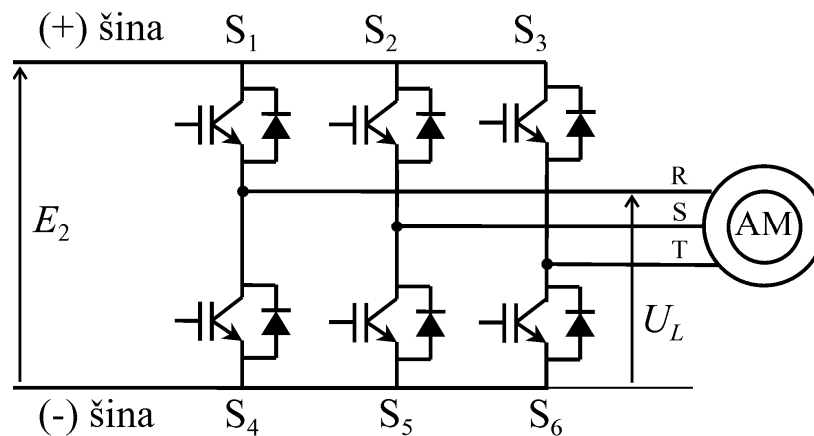


Slika br.15.1.6. Oblik struje pri punjenju baterija

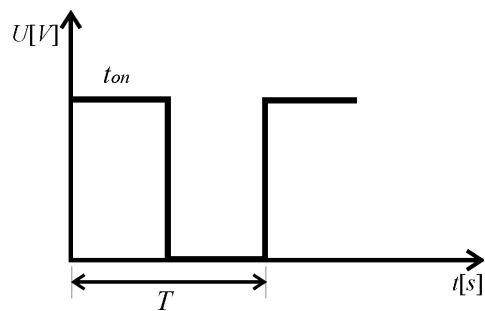
U toku ovog vremena, posmatra se ems baterije u praznom hodu. Ona ne sme da pređe zadatu vrednost.

15.2 Trofazni tiristorski inverter kao vučni pretvarač u električnom automobilu

1. *AM* + *TTI* sa *IŠM* (asinhroni motor i trofazni tranzistorski inverter sa impulsno širinskom modulacijom:



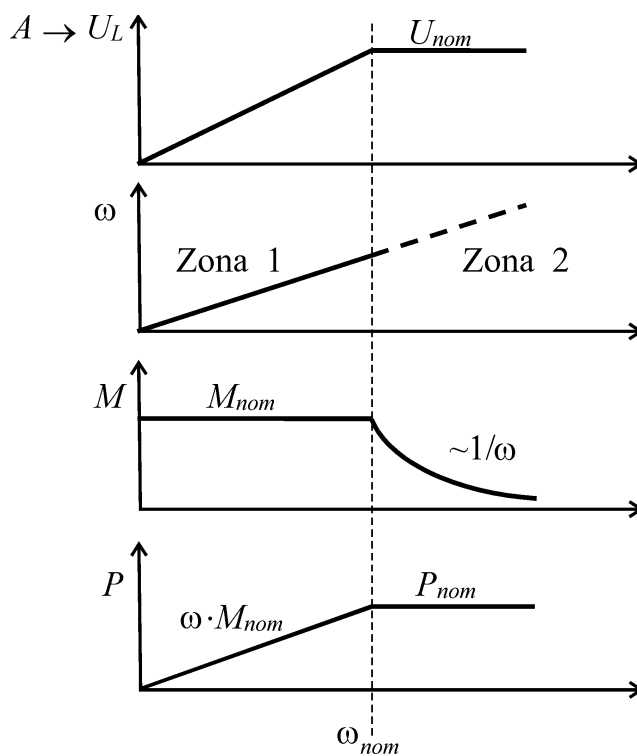
Slika br.15.2.1. Trofazni tranzistorski inverter



Slika br.15.2.2. Vremenski oblik napona

$$t_{on} \sim \frac{T}{2} + \frac{T}{2} A \sin \omega t \quad (13.2.1)$$

Broj A utiče na linijski napon U_L

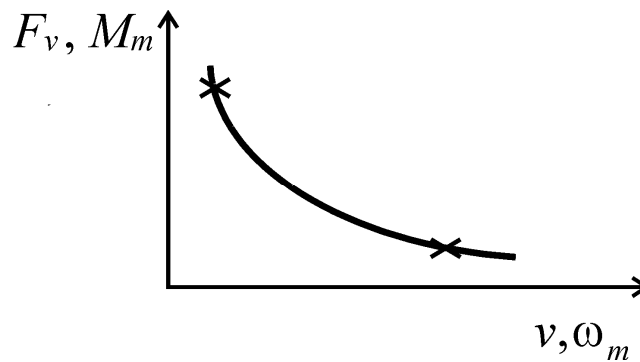


Slika br.15.2.3. Oblik napona, učestanosti, momenta i snage u zavisnosti od brzine

-Zona 1: $U/f = const.$, sledi $\psi_m = const.$

-Zona 2: $U = U_{nom}$ i $f(\uparrow)$, sledi $\psi_m(\downarrow) \sim 1/\omega$

Dobre osobine: široka oblast rada u režimu konstantne snage zahvaljujući AM koji radi u oblasti slabljenja polja. To omogućava da se eliminiše mehanički reduktor:

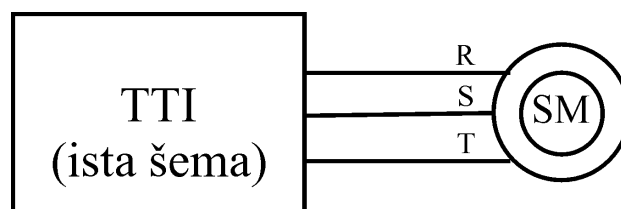


Slika br.15.2.4.

Sa slike se vidi da se može eliminisati prenosnik.

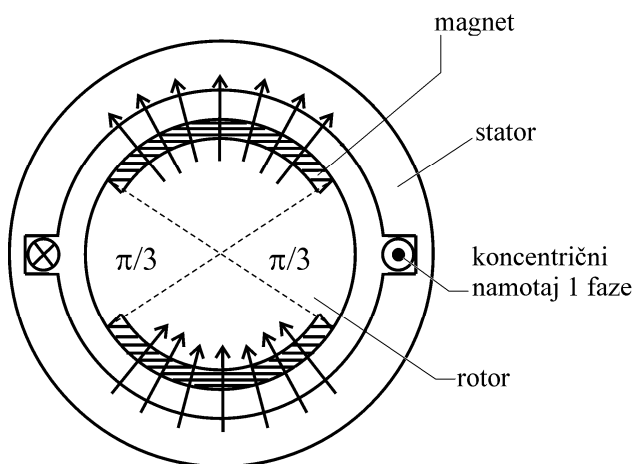
Loše osobine: gubici snage u rotoru AM za posledicu imaju mali stepen korisnog dejstva $\eta < 0,95$. Ovde je η jako bitan jer što je veći, vozilo sa istom baterijom ima veći radijus nego vozilo sa manjim η . Kod velikih vozila η bitno utiče na radijus kretanja. Zbog gubitaka u rotoru javljaju se i problemi hlađenja. Temperatura ležaja, rotora i statora ne sme da pređe $105^{\circ}C$. Toplota u statoru se odvodi rebrima na statoru ili cevima u zatvorenim sistemima. Hlađenje rotora je veći problem (može samo konvekcijom toplote sa rotora na stator).

2. *SM* + *TTI* sa trapezoidnom *EMS* (sinhroni motor i trofazni tranzistorski inverter sa trapezoidnom elektromotornom silom):



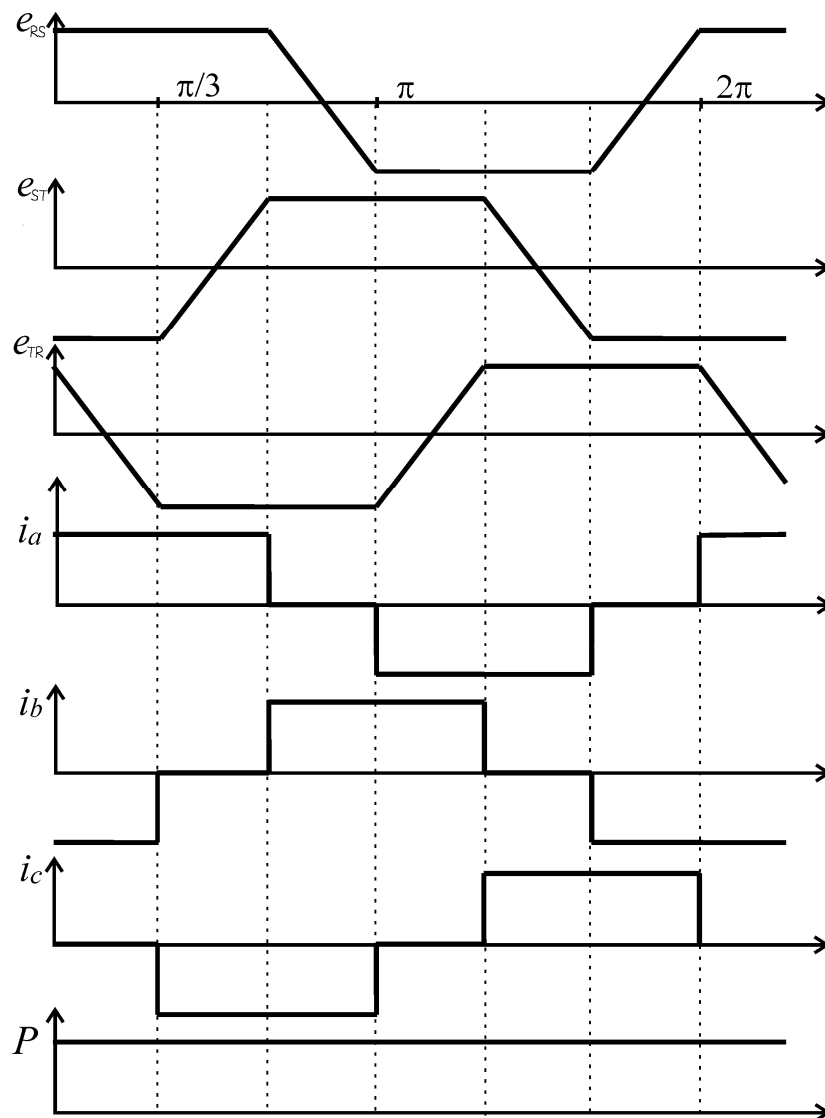
Slika br.15.2.5.

Motor ima permanentne magnete na rotoru (nema gubitaka na rotoru). Konstrukcija ovog sinhronog motora (*SM*):



Slika br.15.2.6. Poprečni presek SM sa permanentnim magnetima

Vide se linije magnetnog polja koje generišu stalni magneti. To polje je homogeno. Prikazan je koncentrični namotaj jedne faze (svi provodnici jedne faze su u dva naspramna žleba).



Slika br.15.2.7. Talasni oblici napona i struja svih faza

-Fluks se menja samo kada se naspram provodnika nalaze linije polja.

-Invertorom, koji je isti kao u prethodnom slučaju, se upravlja tako da uvek vode 2 od 6 prekidača. Kod AM u svakom trenutku su vodila po 3 prekidača. Pošto vodi manje prekidača, manji su i gubici. Napon R-S treba približno da bude e_{RS} .

- Sa šeme se vidi da jedan prekidač može stalno da bude uključen. Drugim se podešava napon R-S.

$$P = e_{RS}i_a + e_{ST}i_b + e_{TR}i_c \quad (13.2.2)$$

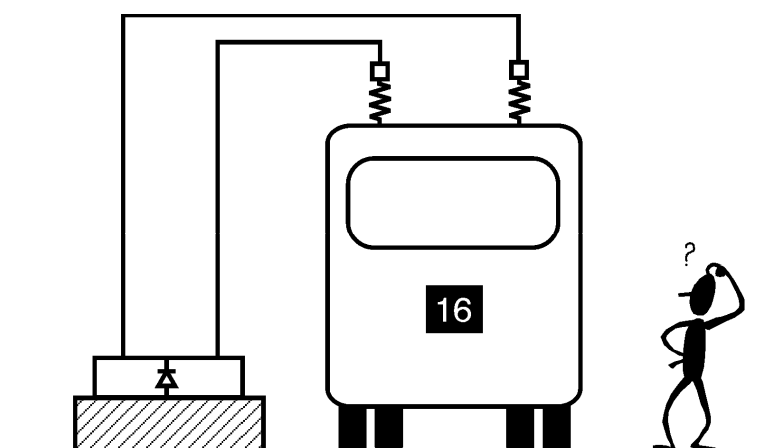
Snaga je konstantna.

Dobre osobine: nema gubitaka u rotoru, lak je za izradu.

Nedostaci: ne može da radi u oblasti slabljenja polja.

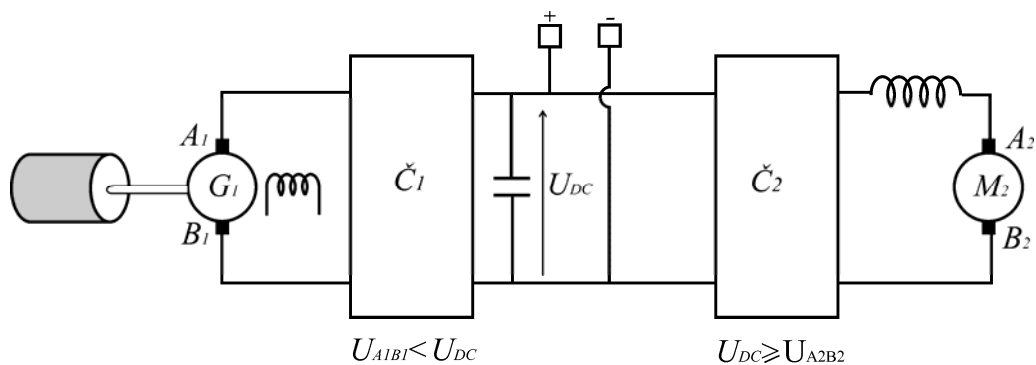
16 Vozila sa zamajcem

Koriste se za prevoz putnika u gradskom saobraćaju. Ova vozila kao akumulator energije koriste zamajac, koji treba da bude dimenzionisan da odgovori potrebnim zahtevima. Da bi se ovakva vozila mogla koristiti potrebno je da na stanici može da se ostvari kontakt sa primarnim izvorom, kao na slici:



Slika br.16.1.

Na svakoj stanici ima ispravljački uređaj. Električna energija iz primarnog izvora se u vozilu akumulira u vidu mehaničke energije, preko mehaničke sprege mašine za jednosmernu struju sa nezavisnom pobudom i zamajca. Ova mehanička energija se posle koristi za pokretanje mašine za jednosmernu struju u generatorskom režimu rada koja napaja vučni motor jednosmerne struje.

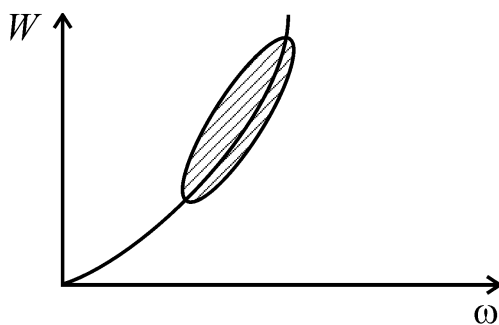


Slika br.16.2. Električna šema pogonskog sistema vozila sa zamajcem

Energija W koja se akumulira:

$$W = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad (14.0.1)$$

Na slici je zavisnost energije od ugaone brzine:



Slika br.16.3.

Zavisnost jedne od druge veličine je kvadratna. Na slici je označena optimalna efikasna zona korišćenja zamajca, koja je preko $\frac{1}{2} \omega_{nom}$.

Masa zamajca je oko 500kg , prečnik je pedesetak cm , a brzina 7000 do 8000 ob/min . Sledi da ima efikasnih 3 do 4kWh akumulirane energije koji mogu pokretati trolejbus (sa 50-ak kW srednje snage). Tri do četiri minuta traje vožnja oko 500m trase između stanica trolejbusa (koji ima oko 10t).

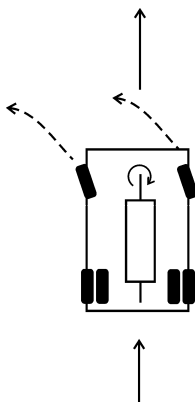
Kad napusti stanicu, trolejbus gubi kontakte i ima zamajac.

Kad zamajac usporava, za istu vučnu snagu treba sve veći momenat, zato nije praktično ići ispod polovine ω_{nom} .

Ne koristi se akumulator jer može samo 500 do 600 (kod nekih tipova maksimalno do 1000) ciklusa punjenja i pražnjenja.

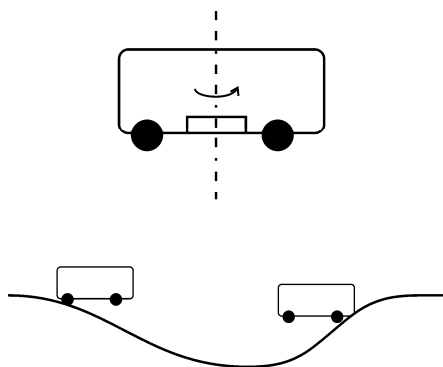
Loše osobine ovog načina pokretanja vozila: buka, opasan je jer kvar na ležajevima - može da ga izbací ($42kg$, 16000 ob/min), teško se upravlja.

Zamajac se ponaša kao žiroskop – ne želi da promeni osu rotacije.



Slika br.16.4.

Okretanjem vozila, zamajac teži da zadrži kretanje pravo. Rešenje je vertikalna osa rotacije, ali na nizbrdici i uzbrdici postoji problem težnje da se zadrži ravno kretanje:



Slika br.16.5.

Zbog toga je korišćenje ograničeno na ravne predele.

PREPORUČENA LITERATURA:

1. B. Radojković: “Jednofazne lokomotive”
2. B. Radojković: “Električna vuča”
3. B. Radojković, M. Todorović: “Zbirka zadataka iz električne vuče”
4. S. Vukosavić, L. Matić, Z. Janda: “Zbirka zadataka iz električne vuče”
5. W. Leonhard: “Control of electrical AC drives”, Springer
6. P. Krause: “Analysis of electric machines”
7. Samuel Seely: “Electromechanical Energy Conversion”, McGraw-Hill
8. Studentske beleške sa predavanja
9. Uputstva za laboratorijske vežbe
10. Trendovi u razvoju digitalno upravljanih električnih pogona
11. Pomoćna literatura koja se može dobiti od profesora S. Vukosavića

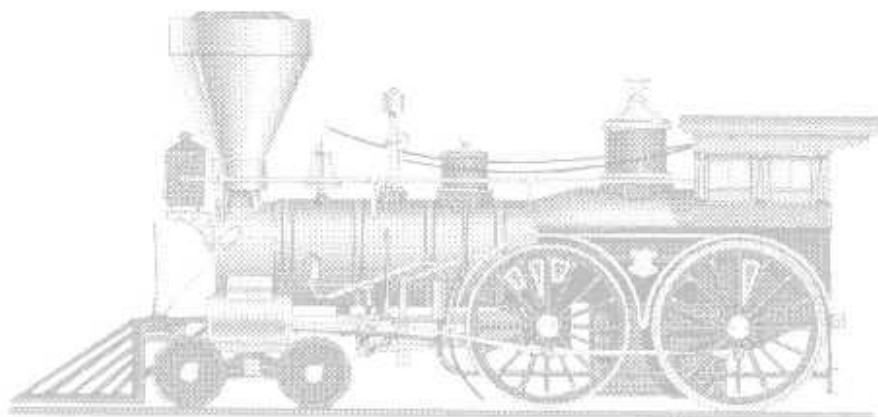
SADRŽAJI NA INTERNETU VEZANI ZA NASTAVU I ISPIT

Web stranica:

<http://vozila.etf.bg.ac.yu>

Kontakt e-mail profesora S. Vukosavića: boban@ieee.org

Nadamo se da će ova skripta biti od izvesnog značaja onome ko je bude koristio. Izvinjavamo se zbog svih neželjenih nedostataka i propusta.



ŽELIMO VAM USPEŠNO UČENJE I
POLAGANJE ISPITA !

