



B&B
VIŠJA STROKOVNA ŠOLA

Diplomsko delo višješolskega strokovnega študija
Program: Logistično inženirstvo
Modul: Železniški promet

SILE PRI GIBANJU VLAKA

Mentor: Jovan Kek, univ. dipl. inž . tehnologije prometa
Lektorica: Azemina Cinac, prof. slovenskega jezika

Kandidat: Boštjan Kočar

Kranj, maj 2012

ZAHVALA

Za pomoč in nasvete pri izdelavi diplomskega dela se zahvaljujem se mentorju Jovanu Keku, univ. dipl. inženirju tehnologije prometa.

Posebna zahvala gre mojim domačim, ki so me ves čas študija spodbujali, me razumeli v momentih, ko mi ni šlo vse po načrtih ter mi dajali prepotrebno podporo in motivacijo, da sem vztrajal do konca študija.

Zahvaljujem se tudi lektorici, profesorici slovenskega jezika Azemini Cinac, ki je lektorirala moje diplomsko delo.

IZJAVA

»Študent Boštjan Kočar izjavljam, da sem avtor tega diplomskega dela, ki sem ga napisal pod mentorstvom Jovana Keka, univ. dipl. inženirja tehnologije prometa.«

»Skladno s 1. odstavkom 21. člena Zakona o avtorskih in sorodnih pravicah dovoljujem objavo tega diplomskega dela na spletni strani šole.«

Dne 17. 5. 2012

Podpis: _____

POVZETEK

V diplomskem delu z naslovom Sile pri gibanju vlaka so predstavljene pasivne in aktivne sile, ki delujejo na vlak pri njegovi vožnji po progi. V nalogi so pojasnjene okoliščine pod katerimi te sile nastajajo in posledice njihovega delovanja na vožnjo.

V uvodnem delu diplomskega dela so prikazani tema, cilj in rezultati diplomskega dela.

Drugo poglavje je namenjeno teoretičnemu opisu načina gibanja teles in preučevanju sil pri gibanju vlaka.

V nadaljevanju so predstavljene aktivne in pasivne sile pri vožnji vlaka skupaj z vsemi upori in ukrepi za odpravo vseh stranskih učinkov, ki jih povzročajo upori pri vožnji vlaka.

Četrto poglavje obravnava sinhronske in asinhronske električne vlečne motorje, njihov način delovanja, ter prednosti in slabosti pri njihovem delovanju. V nadaljevanju je podan primerjalni prikaz vlečne zmogljivosti električne lokomotive vrste 363 in električne lokomotive 541.

V zaključku so navedene ugotovitve.

KLJUČNE BESEDE

- upor vlaka
- upor proge
- vlečna sila
- vlečni motor
- lokomotiva

ZUSAMMENFASSUNG

In der Diplomarbeit mit dem Titel "Kräfte bei der Fortbewegung des Zuges" werden passive und aktive Kräfte dargestellt, die auf den Zug bei dessen Fahrt auf der Strecke einwirken. In der Arbeit werden jene Umstände, unter denen diese Kräfte entstehen und die Folgen deren Einwirkung auf die Fahrt erläutert.

Im Eingangskapitel werden Thema, Ziel und Ergebnisse der Diplomarbeit geschildert.

Das zweite Kapitel ist der theoretischen Beschreibung der Fortbewegungsweise von Körpern und der Erforschung von Kräften bei der Fortbewegung des Zuges gewidmet.

Im Weiteren werden aktive und passive Kräfte bei der Eisenbahnfahrt zusammen mit allen Widerständen und Maßnahmen zur Beseitigung aller Nebenwirkungen dargestellt, die durch diese Widerstände bei der Zugfahrt verursacht werden.

Das vierte Kapitel behandelt die Drehstrom-Synchron- und Asynchronmotoren und deren Wirkungsweise sowie ihre Vor- und Nachteile. In der Fortsetzung wird ein Vergleich zwischen der Zugleistung der elektrischen Lokomotive des Typs 363 und des Typs 541 angestellt.

Abschließend werden Feststellungen angeführt, die der Autor gemacht hat.

SCHLÜSSELWÖRTE:

- Fahrzeugwiderstand
- Streckenwiderstand
- Zugkraft
- Fahrmotor
- Lokomotive

KAZALO

1	UVOD	1
1.1	PREDSTAVITEV PROBLEMA	1
1.2	PREDSTAVITEV OKOLJA.....	1
1.3	PREDPOSTAVKE IN OMEJITVE	2
1.4	METODE DELA	2
2	SPLOŠNO O SILAH PRI GIBANJU VLAKA	3
2.1	TEORIJA PREUČEVANJA SIL PRI GIBANJU VLAKA.....	3
2.2	NAČINI GIBANJA TELES	3
2.2.1	ENAKOMERNO GIBANJE	4
2.2.2	ENAKOMERNO SPREMENLJIVO GIBANJE.....	4
2.2.3	NEENAKOMERNO GIBANJE IN POSPEŠEK	5
3	AKTIVNE IN PASIVNE SILE PRI VOŽNJI VLAKA	7
3.1	AKTIVNE SILE.....	7
3.1.1	ENAČBA GIBANJA.....	7
3.1.2	ENAČBA GIBANJA PRI IZTEKU VLAKA	8
3.1.3	ENAČBA GIBANJA PRI ZAVIRANJU VLAKA	8
3.2	AKTIVNE SILE PRI GIBANJU VLAKA	8
3.2.1	VLEČNA SILA.....	8
3.2.2	VLEČNA KARAKTERISTIKA VLEČNEGA VOZILA	9
3.2.3	KRITIČNA HITROST VLEČNEGA VOZILA.....	11
3.2.4	ADHEZIJSKA SILA ALI ADHEZIJA.....	11
3.2.5	ADHEZIJSKA TEŽA.....	12
3.2.6	ADHEZIJSKI KOEFICIENT	12
3.3	PASIVNE SILE PRI GIBANJU VLAKA	13
3.3.1	VRSTE VOZNIH UPOROV	13
3.3.2	OSNOVNI ALI STALNI UPOR	14
3.3.3	UPOR KOTALJENJA KOLESA PO TIRNICI	15
3.3.4	UPOR KOTALJENJA ZARADI UGREZANJA KOLES V TIRNICE	15
3.3.5	UPOR KOTALJENJA ZARADI UPOGIBANJA TIRNIC	15
3.3.6	UPOR KOTALJENJA ZARADI DRSANJA KOLES.....	16
3.3.7	UPOR TRENJA ZARADI BOČNEGA POMIKANJA KOLES.....	16
3.3.8	UPOR KOTALJENJA ZARADI RAZLIČNIH PREMEROV KOLES	16
3.3.9	UPOR KOTALJENJA ZARADI IZRABLJENOSTI SLEDILNIH GREBENOV	17
3.3.10	UPOR KOTALJENJA ZARADI NAGNJENOSTI TIRA	17
3.3.11	UPORI ZARADI UDARCEV KOLES PO TIRNICAH.....	17
3.3.12	UPOR ZARADI TRENJA V DRSNIH LEŽAJIH.....	18
3.3.13	UPOR KOTALJENJA V KOTALNEM LEŽAJU	19
3.4	OBČASNI UPORI	20
3.4.1	UPOR VZPONA PROGE	20
3.4.2	UPOR TIRNEGA LOKA	22
3.4.3	UPOR PREDORA.....	24
3.4.4	DODATNI UPORI	24
3.4.5	UPOR SPELJAVE VLAKA	25

3.4.6	UPOR ZARADI VETRA	25
4	VLEČNI MOTORJI ELEKTRIČNIH VLEČNIH VOZIL.....	26
4.1	SPLOŠNO O ELEKTRIČNIH VLEČNIH MOTORJIH.....	26
4.1.1	TOPLOTNI KRITERIJI VLEČNIH MOTORJEV	26
4.2	DELOVANJE VLEČNIH MOTORJEV NA ENOSMERNI TOK	27
4.2.1	REGULACIJA VLEČNIH MOTORJEV NA ENOSMERNI TOK	27
4.3	DELOVANJE ASINHRONSKIH VLEČNIH MOTORJEV.....	28
4.3.1	SESTAVA IN DELOVANJE ASINHRONSKEGA MOTORJA.....	29
4.3.2	REGULACIJA IN ZAGON ASINHRONSKIH VLEČNIH MOTORJEV	30
4.3.3	PRIMERJAVA ENOSMERNIH IN ASINHRONSKIH MOTORJEV GLEDE NA NJIHOVO UPORABNOST ZA VLEČNE MOTORJE	31
4.4	PRIMERJAVA VLEČNIH ZMOGLJIVOSTI ELEKTRIČNIH LOKOMOTIV SERIJE 541 IN SERIJE 363	31
4.4.1	VLEČNE KARAKTERISTIKE ELEKTRIČNE LOKOMOTIVE 541	31
4.4.2	VLEČNE KARAKTERISTIKE ELEKTRIČNE LOKOMOTIVE 363.....	34
5	ZAKLJUČKI.....	37
	LITERATURA IN VIRI.....	39
	KAZALO SLIK.....	40
	KAZALO TABEL	40
	KRATICE IN AKRONIMI.....	40

1 UVOD

1.1 PREDSTAVITEV PROBLEMA

Učinkovitost gospodarstva vsake razvite družbe je odvisna predvsem od delovanja njenega prometnega sistema, saj je promet dejavnik, ki neposredno vpliva na pospeševanje ali omejevanje in zaviranje razvoja družbe kot celote.

Železniška infrastruktura je skupaj z ostalimi službami pomemben del tega sistema. Njena posodobitev je prvi pogoj za ustrežnejše vključevanje Slovenije v evropsko prometno mrežo in za ugodnejši pretok potnikov, blaga in storitev med nami in drugimi evropskimi državami. Zaradi značilne prometne lege Slovenije in naraščanja cestnega tranzitnega prometa je razvoj železniške infrastrukture hkrati pomemben dejavnik ohranitve okolja in prostora ter je lahko ena od primerjalnih prednosti Slovenije v evropskem prometnem okolju.

Primarna naloga železnice je zagotoviti potnikom in tovoru hitro, zanesljivo in varno prometno povezavo med posameznimi kraji. Za uspešno izvajanje te naloge ima poleg vseh ostalih služb, ki enakovredno sodelujejo pri izvajanju železniškega prometa svoje mesto tudi Služba za vlečno dejavnost skupaj z vlečnimi vozili.

Obstoječe železniške proge, ki so pretežno zgrajene še v prejšnjem stoletju, s krivinami polmera okrog 300 m, s pogostimi nivojskimi križanji in nagibi do 27‰ niti glede svojih parametrov niti glede zmogljivosti ne ustrezajo več sodobnim prevoznim potrebam. Te potrebe se kažejo v višjih hitrostih, večji pogostosti vlakov, večji udobnosti prevoznih sredstev, večji zanesljivosti in predvidljivosti ter višji kakovosti storitev v potniškem in v tovarnem prometu.

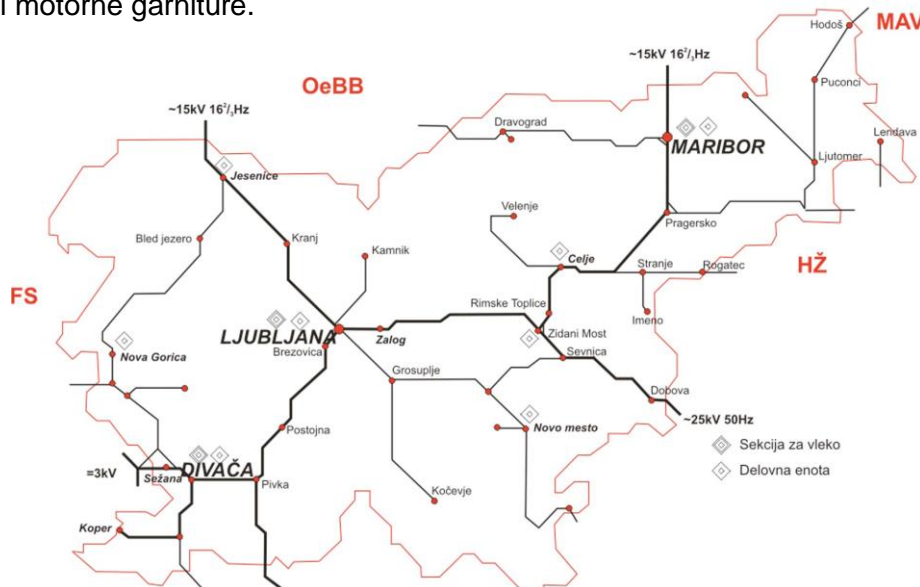
Za zagotavljanje zgoraj navedenih kriterijev boljše kakovosti prevoznih storitev je nujna nabava novih vlečnih vozil. Zaradi naše zemeljske majhnosti in nizkih gospodarskih ter tehničnih potencialov ni pričakovati, da bi v Sloveniji kdaj izdelovali železniška vlečna vozila. Verjetno bomo na tem področju ostali odvisni od nakupa teh vozil od razvitejših držav, ki razpolagajo z raziskovalnimi in razvojnimi potenciali na tem področju. Prav zaradi tega pa moramo poznati osnovne tehnične značilnosti delovanja in izkoriščanja teh vozil. Pri tem naj bo poudarek na poznavanju osnovnih tehničnih parametrov in značilnosti vlečnih in vlečenih vozil, ki določajo pogoje za vožnjo oziroma vleko vlakov. Le tako se bodo odgovorni železniški kadri lahko odločili za gospodaren nakup vozilnih sredstev in nato tudi organizirali njihovo gospodarno izkoriščanje.

Pri vožnji vlakov vsekakor delujejo zakonitosti iz področja fizike, ki preučujejo gibanje teles. Prav natančno preučevanje teh zakonitosti in nova odkritja prispevajo največji delež v razvoju vseh vrst prometa, ne samo železniškega, ki je v zadnjih dvajsetih letih napravil večje razvojne korake, kot prej v stotih letih.

1.2 PREDSTAVITEV OKOLJA

V okviru Holdinga Slovenskih železnic d.o.o, deluje organizacijska enota Vleka, v okviru katere deluje Služba za vzdrževanje, načrtovanje in izvajanje vlečne dejavnosti. Osnovna naloga organizacijske enote Vleka je zagotavljanje vozil in

osebja za opravljanje železniškega prometa, izvajanje strokovno-tehničnih opravil v zvezi z vzdrževanjem vozil, pripravo prometa, pripravo elementov za izračun stroškov vleke, sodelovanje pri dogovorih s predstavniki tujih železniških uprav za obmejne storitve vleke ter opravljanje drugih del s tega področja. Za izvajanje temeljne dejavnosti na Slovenskih železnicah, to je prevoz potnikov in blaga ter premik vagonov, se uporabljajo električne in dizelske lokomotive ter elektromotorne in dizel motorne garniture.



Slika 1: Območje dejavnosti OE Vleka
(Vir: Holding Slovenske železnice, d.o.o, Organizacijski predpis 999. 11)

Organizacijska enota Vleka je organizirana na nivoje Služb in Sekcij za vleko, v okviru katerih delujejo Delovne enote.

1.3 PREDPOSTAVKE IN OMEJITVE

Diplomsko delo je omejeno na prikaz delovanja pasivnih in aktivnih sil in pri tem nastalih uporov na vožnjo vlaka ter razlago nastanka vlečne sile na vlečnem vozilu. V nadaljevanju diplomskega dela je narejena primerjava sinhronskega in asinhronskega električnega vlečnega motorja s svojimi prednostmi in slabostmi v času obratovanja in primerjava vlečnih sposobnosti električne lokomotive vrste 541 in 363 pri vožnji tovornega vlaka.

1.4 METODE DELA

V diplomskem delu so uporabljene naslednje metode dela:

- Metoda opisovanja,
- Metoda primerjanja,
- Metoda analize in sinteze,
- Metoda že znanih dejstev.

2 SPLOŠNO O SILAH PRI GIBANJU VLAKA

2.1 TEORIJA PREUČEVANJA SIL PRI GIBANJU VLAKA

V vsakdanjem življenju pogosto uporabljamo pojem sila. S pojmom sile običajno izražamo in razumemo določeno dejavnost, ki povzroča gibanje ali spremembo načina gibanja teles. Če se neko telo premakne iz mirujočega stanja v gibajoče stanje, mora nanj delovati neka sila. Na gibajoče telo torej deluje sila, ki povzroča gibanje, pri tem pa običajno deluje na telo tudi sila, ki nasprotuje temu gibanju. Delovanje prve sile je pozitivno, delovanje druge sile pa negativno.

Teorija preučevanja sil pri gibanju vlaka obsega preučevanje sil, katere delujejo na vlak in premikanje vlaka pod vplivom teh sil. Raziskovanje sil, ki nastanejo pri gibanju vlaka, raziskujemo v okviru predmeta, ki ga imenujemo Dinamika vleke. Teorija dinamike vleke, je zasnovana na osnovah in zakonih mehanike in ostalih tehničnih ved termodinamike, hidravlike, elektrotehnike, kot tudi na mnogih vrstah specialnega raziskovanja, merjenja in sledenja posameznih pojavov in procesov. V okviru tega predmeta se poleg niza zakonov, ki so zasnovani na teoretični osnovi uporabljajo tudi zakoni do katerih se je prišlo izključno po empirični poti.

Nekatere sile učinkujejo na daljavo, skozi brezzračni prostor, kot npr. gravitacijska sila, električna sila, magnetična sila ipd. To so sile z velikim dosegom. Na vozeči vlak deluje mnogo sil, ki so posledica raznih vzrokov. Pri dinamiki vleke vlakov se obravnavajo le tiste sile, ki vplivajo na njihovo gibanje. Druge tako imenovane »notranje sile« se pri proučevanju dinamike vleke vlakov ne upoštevajo, ker so bolj pomembne pri dimenzioniranju posameznih delov železniških vozil. Sile, ki povzročajo spremembe hitrosti vožnje vlakov so predvsem vlečne sile, sile vozniških odporov in zavorne sile.

2.2 NAČINI GIBANJA TELES

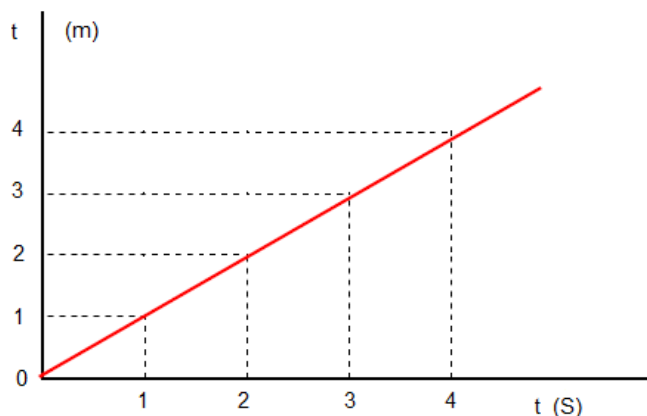
Telesa na površini zemlje opazujemo s predpostavko, da zemlja miruje. Pri gibanju se lahko telesa premikajo in/ali vrtijo. Že po omembi gibanja zemlje in sonca pa tudi ugotovimo, da se vse vrste gibanj dogajajo v prostoru, čeprav jih za preučevanje delimo na dve glavni vrsti, ki sta:

- pravo prostorsko ali večdimenzionalno gibanje,
- ploskovno ali enodimenzionalno gibanje.

Ploskovno gibanje je lahko linijsko gibanje (vožnja vlaka po progi) ali kroženje. Linijsko gibanje telesa po premici je premo gibanje. Vožnja vlaka je vsekakor linijsko gibanje, ni pa premo gibanje, čeprav ga bomo kot takšnega obravnavali. Gibanje, med katerim telesa spreminjajo njihovo mesto nahajanja oziroma se premikajo, imenujemo tudi translatorno gibanje. Telesa, ki se na mestu vrtijo se sicer gibljejo, vendar se ne premikajo, torej so brez translatornega gibanja.

2.2.1 ENAKOMERNO GIBANJE

Telo se giblje enakomerno, če se premika na enakih dolžinah poti v enakih časih. Graf prevožene poti in časa pri enakomernem gibanju je premica.



Slika 2: Graf prevožene poti in časa pri enakomernem gibanju
(Vir: Lasten)

Enakomerno vožnjo vlaka izražamo s prevoženo potjo (l), trajanjem vožnje (t) in hitrostjo vožnje (v). Vlak prevozi v časovnem presledku ali intervalu $t = t_2 - t_1$ pot dolžine $l = l_2 - l_1$. Kvocient ali količnik med prevoženo potjo vlaka (l) in med tem pretečenim ali voznim časom (t), je merilo hitrosti vožnje vlaka:

$$v = \frac{(l_2 - l_1)}{(t_2 - t_1)} = \frac{\Delta l}{\Delta t}$$

Hitrost (vožnje) je kvocient (prevožene) poti in časa.

$$v = \frac{l}{t} \left(\frac{m}{s} \right)$$

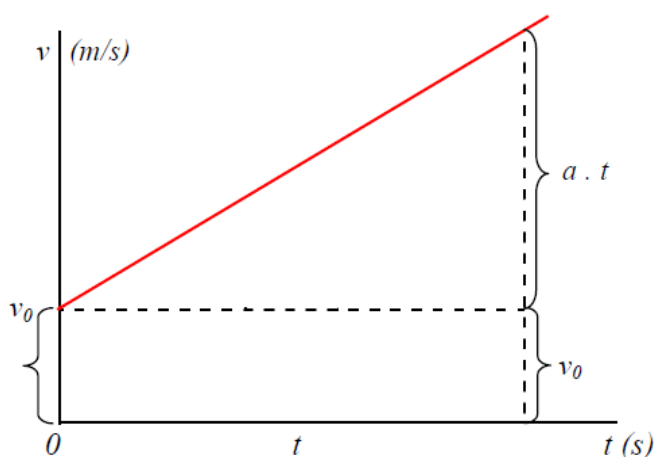
Hitrost vlaka torej pomeni prevoženo pot v enoti časa. Kot je že zgoraj napisano, uporabljamo merski enoti za pot in čas meter (m) oziroma sekundo (s), iz česar sledi sestavljena merska enota za hitrost meter/sekundo (m/s), kar izgovorimo kot meter na sekundo; običajno pa uporabljamo manjšo mersko enoto za hitrost, to je kilometer/uro (km/h), kar izgovorimo kot kilometer na uro.

2.2.2 ENAKOMERNO SPREMENLJIVO GIBANJE

Če se telo giblje s spremenljivo hitrostjo tako, da je sprememba hitrosti v vsaki sekundi enaka, takšno gibanje imenujemo enakomerno spremenljivo gibanje. Glede na to, ali se pri tem hitrost višja ali nižja, govorimo o enakomerno pospešenem in enakomerno pojemajočem gibanju. Če vlak na primer vozi po progi s padcem, se mu hitrost stalno večja, nasprotno pa se mu pri vožnji po progi z vzponom hitrost manjša.

V prvem primeru obstaja pospeševanje hitrosti vožnje vlaka, v drugem primeru pa pojemanje hitrosti vožnje. Kadar vlak že vozi z neko hitrostjo v_0 , v trenutku $t = 0$ pa prične pospeševati, hitrost v_0 imenujemo začetna hitrost, to je hitrost v začetnem trenutku, ko se pojavi pospešek. Hitrost v naslednjem trenutku t je vsota začetne hitrosti v_0 in dodatka hitrosti zaradi pospeševanj. Pospešek (a) pove, za koliko se hitrost poveča v eni časovni enoti, po času (t) se hitrost torej poveča za $a \times t$. Dodatek hitrosti zaradi pospeševanja narašča sorazmerno s časom, kar lahko zapišemo z enačbo:

- v - hitrost,
- V_0 - začetna hitrost,
- a - pospešek,
- t - čas



Slika 3: Naraščanje hitrosti sorazmerno s časom
(Vir: Franc Širec, *Dinamika vleke*; 2003)

2.2.3 NEENAKOMERNO GIBANJE IN POSPEŠEK

Običajno se telesom med gibanjem spreminja hitrost s časom, tako da je gibanje v splošnem neenakomerno in sicer:

- pospešeno, če se hitrost s časom zvišuje in
- pojemajoče, če se hitrost s časom znižuje.

Na začetku vožnje oziroma pri speljavi vlaka, kot to imenujemo, je vožnja pospešena kar pomeni, da v vsaki naslednji časovni enoti vlak prevozi daljšo pot. Zaustavljanje vlaka je pojemajoča vožnja, kar nasprotno pomeni da je v vsaki naslednji časovni enoti prevožena pot vlaka manjša, torej se hitrost niža do vrednosti nič, ko se vlak zaustavi. Dokler je hitrost vožnje potniškega vlaka stalno enaka, potniki v njem ne občutijo vožnje, razen z vidnim zaznavanjem gibanja zunanje okolice.

Hitre spremembe hitrosti vožnje vlaka potniki takoj občutijo, počasnejših pa ne. To pomeni, da je pri hitrosti vožnje pomemben tudi čas, v katerem se neka hitrost spremeni. Večje so spremembe hitrosti v krajšem času, bolj je vožnja pospešena ali pojemajoča.

Pospešek je spreminjanje hitrosti s časom. Pospešek označujemo s črko a oziroma simbolom iz besede acceleration, ki je v več jezikih podobna. Večja je sprememba hitrosti v določenem časovnem presledku, večji je pospešek a . Pospešek je količnik med spremembo hitrosti in časovnim presledkom, v katerem se je sprememba zgodila, kar lahko zapišemo z enačbo:

$$a = \frac{(v_2 - v_1)}{(t_2 - t_1)} = \frac{\Delta l}{\Delta t} \left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right)$$

Za izračun prevožene poti pri enakomerno spremenljivi hitrosti vožnje moramo najti povprečno ali srednjo hitrost vožnje v_{sr} . Povprečna ali srednja hitrost vožnje vlaka v_{sr} je hitrost, s katero bi moral vlak ves čas enakomerno voziti, da bi v času t prevozil enako dolgo pot, kot če vozi enakomerno, kar lahko zapišemo:

$$l = v_{sr} \times t \text{ (m)}$$

Pri enakomerno spremenljivem gibanju se hitrost viša ali niža enakomerno s časom, zato je srednja hitrost kar aritmetična sredina med začetno in končno hitrostjo.

3 AKTIVNE IN PASIVNE SILE PRI VOŽNJI VLAKA

3.1 AKTIVNE SILE

3.1.1 ENAČBA GIBANJA

Izhodišče za gibanje vlaka je enačba gibanja vlaka. Enačba gibanja oziroma vožnje vlaka je matematično izražena odvisnost med pospešeno hitrostjo vožnje vlaka in silami, ki pri tem delujejo. Na osnovi te enačbe se določa obremenitev lokomotiv, izračunavajo se vožni časi vlaka, računa se prevoženo pot vlaka in porabljeno energijo pri vleki vlaka. Enačbo gibanja vlaka zapišemo v naslednji obliki:

$$F(v, l, \text{regulacija strojevodje}) = W(v) + S(i) + W_{loka}(r) + W_{pos.}(F, v)$$

- W – osnovni upor,
- v – hitrost vlaka,
- S – upor vzpona
- $W_{(loka)}$ – upor loka – krivine,
- $W_{(pos.)}$ – upor pospeševanja oz. pojemanja
- F – sila

Leva stran enačbe predstavlja akcijsko silo, druga desna stran pa vsoto reakcijskih sil, ki so predstavljene kot upori pri vožnji vlaka. Pri vožnji vlaka akcijsko silo predstavlja vlečna sila vlečnega vozila, ki jo označujemo z F . Vlečna sila vlečnega vozila F je odvisna od hitrosti vlaka (v), električnega toka (I) in regulacije strojevodje, ki je odvisna od načina uravnavanja vlečne sile z manipulatorjem vlečne sile na lokomotivi. Akcijska sila se pojavlja vedno na obodu koles.

Prvi trije členi na desni strani enačbe predstavljajo danost dogajanja na naši zemeljski obli. Prvi člen enačbe $W(v)$, je odvisen od gravitacijskega pospeška, trdote materialov med katerimi se dogaja gibanje in gostote medija, v katerem se to gibanje dogaja. Drugi člen enačbe $S(i)$, predstavlja posledico trasiranja proge preko planin in dolin, tretji člen enačbe $W_{(loka)}$ predstavlja posledico trasiranja prog okoli hribov in planin.

Pri vleki, četrti člen enačbe $W_{(pos.)}$, predstavlja korekturni člen enačbe tako, da je med levo in desno stranjo enačbe vedno enačaj. Četrti člen enačbe $W_{(pos.)}$ je produkt mase in pospeška in ker je masa konstantna, se mora spreminjati pospešek. Kadar se spremeni vlečna sila $F_{(v)}$ oziroma eden od prvih treh členov desne strani enačbe $W(v) + S(i) + W_{loka}(r)$, se mora za ohranitev ravnovesja med vlečno silo in voznimi upori na desni strani enačbe spremeniti tudi zadnji člen enačbe, ki nastopa kot korekturni člen.

Kadar je vlečna sila večja od prvih treh členov na desni strani enačbe mora biti produkt $(m \times a)$ pozitiven, da lahko govorimo o pospešen gibanju ($a > 0$) in obratno, če je vlečna sila manjša od vsote prvih treh členov desne strani enačbe in je produkt $(m \times a)$ negativen takrat govorimo o pojemajočem gibanju ($a < 0$) V kolikor je vlečna sila enaka vsoti prvih treh členov desne strani enačbe in je produkt $(m \times a = 0)$ gre za enakomerno gibanje ($a = 0$).

3.1.2 ENAČBA GIBANJA PRI IZTEKU VLAKA

O enačbi gibanja pri izteku vlaka govorimo takrat, ko imamo na levi strani enačbe vrednost nič, kar praktično pomeni, da se vlak giblje brez vlečne sile samo z kinetično energijo mase vlaka. Vozni odpori delujejo na vlak do njegove zaustavitve. Enačbo gibanja pri izteku vlaka zapišemo v naslednji obliki:

$$0 = w(v) + S(i) + W_{loka}(r) + W_{pos}(F, v)$$

- W – osnovni upor,
- v – hitrost vlaka,
- S – upor vzpona
- $W_{(loka)}$ – upor loka – krivine,
- $W_{(pos.)}$ – upor pospeševanja oz. pojemanja.

3.1.3 ENAČBA GIBANJA PRI ZAVIRANJU VLAKA

Pri gibanju vlaka, ki je posledica zaviranja vlaka imamo na levi strani enačbe prav tako vrednost nič (ni vlečne sile), na desni strani enačbe pa se pojavi novi člen, ki ga imenujemo upor zaviranja in je odvisen od hitrosti vlaka in pritiska tlaka v zavornih valjih zavor.

$$0 = W(v) + S(i) + W_{loka}(r) + W_{pos.}(F, v) + W_{zav}(v, p)$$

- W – osnovni upor,
- v – hitrost vlaka,
- S – upor vzpona
- $W_{(loka)}$ – upor loka – krivine,
- $W_{(pos.)}$ – upor pospeševanja oz. pojemanja,
- W_{zav} – upor zaviranja,
- p – tlak v zavornih valjih.

3.2 AKTIVNE SILE PRI GIBANJU VLAKA

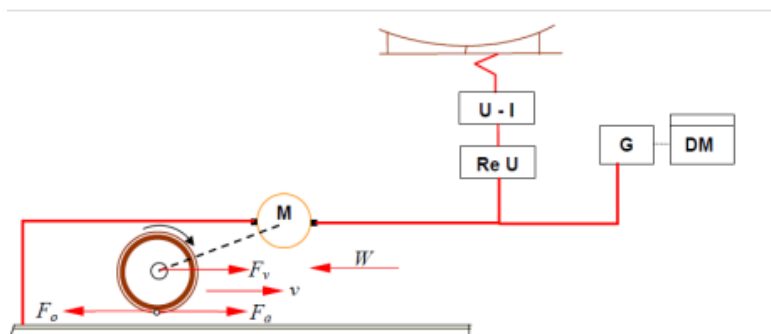
3.2.1 VLEČNA SILA

Osnovna zahteva, ki se postavlja pri vleki vlakov je, da je prevoz potnikov in blaga hiter in ekonomičen. Gledano iz ekonomskega vidika sta si te dve zahtevi kontradiktorni in je zato optimalna rešitev nekje vmes med tema dvema zahtevama. Za doseganje kompromisa med tema dvema zahtevama, sodobna vlečna vozila proizvajajo vlečno silo, ki je primerna za različne nastale pogoje pri vleki vlakov. Vlak sestavljajo vlečna in vlečena vozila katerih vožnja je določena s spremembami osnovnih, med seboj odvisnih fizikalnih veličin mehanike: hitrosti, časa, dolžine poti in mase.

Naloga vlečnega vozila pri vožnji vlaka je, da proizvaja takšno vlečno silo, ki omogoča pospeševanje hitrosti pri speljavi vlaka in, da premaga vse upore, ki se pojavljajo pri gibanju vlaka. Sila, ki povzroča gibanje oziroma vožnjo vlaka in pri tem premaguje upore proti njegovemu gibanju je tako imenovana vlečna sila F_v .

Vlečna sila, ki jo proizvede vlečno vozilo kot notranjo silo predstavlja prvenstveni pogoj za vožnjo vlaka. Notranjo silo vlečnega vozila definiramo kot aktivno vlečno silo, ki se pri stiku pogonskih koles s tirnicama železniškega tira ustvari na obodu pogonskih koles in je odvisna od :

- od prenosnega razmerja zobniškega prenosa rotorja in kolesne dvojice,
- od premer kolesa,
- od število vlečnih motorjev in
- od vrtilnega momenta vlečnega motorja.



Slika 4: Prikaz nastanka vlečne sile pri dizelskem vlečnem vozilu
(Vir: Franc Širec, Dinamika vleke; Maribor 2003)

To silo označujemo z F_0 in se prenese na samo vlečno vozilo in njegov vlečni kavelj. Vlečna sila največkrat z naraščajočo hitrostjo hitro upada, izjema je vlečno vozilo z dizel mehanskim prenosom moči (menjalnikom).

Poleg vlečne sile je pomemben dejavnik pri vleki vlaka tudi adhezijska sila na obodu pogonskega kolesa vlečnega vozila. Pri vožnji vlaka, z večanjem vlečne sile, nima smisla iti v nedogled, ker obstaja nevarnost, da se soočimo z nevarnostjo, da prekoračimo adhezijsko silo, kar ima za posledico zdrs pogonskega kolesa. Prav tako je pri vožnji vlaka pomembno pretirano zmanjševanje vlečne sile, saj obstaja nevarnost da vsota vseh uporov, ki nasprotujejo gibanju vlaka, preseže velikost vlečne sile, kar ima za posledico zmanjševanje hitrosti vlaka. Idealna vlečna sila je torej tista sila, ki se ustvarja v režimu stalne moči na obodu pogonskih kolesih ter je pri tem pravilno odmerjena, neprekinjena, brez naglih sprememb pri spremembi hitrosti, ne glede na razpon delovnih hitrosti, pri svojem razvijanju pa ne proizvaja negativnih sil in momentov.

3.2.2 VLEČNA KARAKTERISTIKA VLEČNEGA VOZILA

Razen velikosti vlečne sile na obodu pogonskih koles F_0 je za vlečne izračune pomemben tudi podatek, pri kateri hitrosti ima vlečno vozilo določeno vlečno silo. Za oceno eksploatacijskih značilnosti nekega vlečnega vozila je zelo važna oblika krivulje, ki prikazuje vrednost vlečne sile na obodu pogonskih koles v odvisnosti od hitrosti $F_0 = f(v)$.

To krivuljo imenujemo vlečna karakteristika vlečnega vozila. Vlečna karakteristika torej prikazuje dejanske vrednosti vlečne sile pri raznih hitrostih, iz česar je tudi

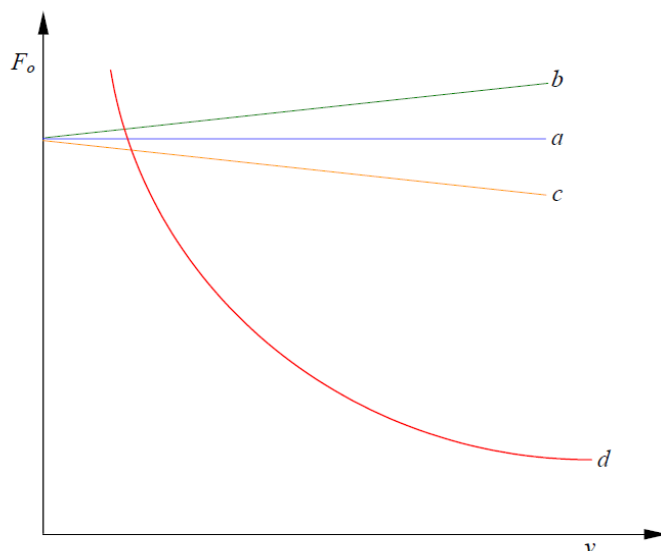
razvidno, da je vlečna sila pri nizkih hitrostih omejena z adhezijsko vlečno silo, pri višjih hitrostih pa z vgrajeno močjo pogonskih motorjev.

Za vsako vlečno vozilo obstaja osebna legitimacija, ki jo imenujemo vlečna karakteristika, ki nam pove, kako se spreminja vlečna sila na obodu koles v odvisnosti od hitrosti. Pri podajanju vlečne karakteristike za neko vozilo, gre predvsem za opis dveh najvažnejših podatkov vlečne sile in to sta:

- minimalna hitrost pri trajni moči in
- trajna sila pri minimalni hitrosti trajne moči.

Izhodišče za konstruiranje vlečne karakteristike predstavlja sama namembnost vlečnega vozila oziroma za katero vrsto vleke se bo to vozilo uporabljalo:

- velika hitrost in majhna vlečna sila ali
- majhna hitrost in velika vlečna sila.



Slika 5: Prikaz odvisnosti vlečne sile od hitrosti
(Vir: Franc Širec, *Dinamika vleke*; Maribor 2003)

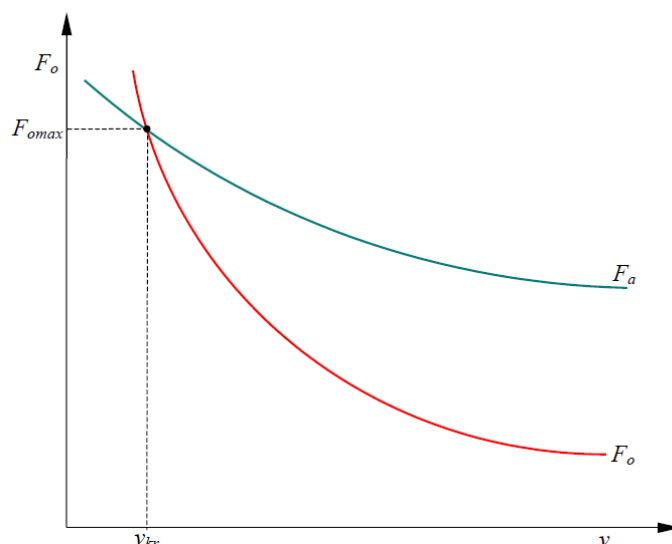
- črta a ustreza karakteristiki stalno enake vrednosti vlečne sile ne glede na hitrost,
- črta b je podobna črti a z razliko malega povečanja vlečne sile pri višanju hitrosti,
- pri črti c se vlečna sila premočrtno manjša z višanjem hitrosti,
- krivulja d kaže hiperbolično odvisnost vlečne sile od hitrosti.

Za vleko vlakov je primerna vlečna karakteristika, ki zagotavlja takšno odvisnost med vlečno silo in hitrostjo, da je pri ustrezni omejitvi moči pogonskega stroja omogočena speljava vlaka na odločilnih vzponih in njegova vleka z največjo dovoljeno hitrostjo (v_{max}) na vodoravni ravni progi. Ti mejni pogoji zahtevajo veliko vlečno silo pri speljavi in relativno malo vlečno silo pri največjih hitrostih. Tem zahtevam najbolj ustreza krivulja d.

Vlečne karakteristike so namenjene za vlečne izračune, s katerimi se določajo obremenitve lokomotiv oziroma največje mase vagonov za vozno vleklo na posameznih vlečnih relacijah in za določanje vozno vremenih časov vlakov med postajami. Ugotavljajo se s praktičnimi preskusi in meritvami vlečnih sil ali se računajo teoretično z matematično-analitičnimi metodami, v novejši dobi pa tudi z računalniškimi modulacijami.

3.2.3 KRITIČNA HITROST VLEČNEGA VOZILA

Največja vlečna sila je potrebna pri speljavi vlaka ter pri vožnji težkih vlakov na odločilnih uporih prog. Ker pa je vlečna sila na obodu pogonskih koles F_o omejena z adhezijsko vlečno silo F_a , obstaja pri vsakem vlečnem vozilu neka najmanjša hitrost, pri kateri sta ti dve sili enaki. Hitrost vožnje vlečnega vozila v točki sekanja vlečne karakteristike s krivuljo adhezijske vlečne sile se imenuje kritična hitrost vlečnega vozila in je za vsako vrsto vlečnega vozila različna in navedena v tehničnih podatkih.



Slika 6: Prikaz kritične hitrosti v koordinatnem sistemu
(Vir: Franc Širec, *Dinamika vleke*; Maribor 2003)

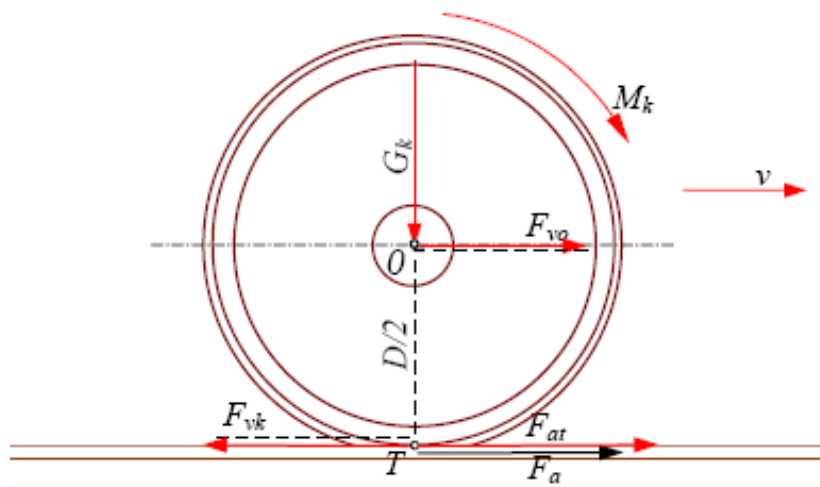
3.2.4 ADHEZIJSKA SILA ALI ADHEZIJA

Ko je lokomotiva na tiru, z njeno gravitacijsko težo G_a povzroča pritisk pogonskih koles na tirnici. Pritisk koles na tirnici železniškega tira v železniški terminologiji imenujemo tudi osna obremenitev tira oziroma proge. Rezultat pritiska pogonskih koles na stiku s tirnicama je kotalna torzna sila pogonskih koles na tirnicah, katere smer je nasprotna smeri vrtenja pogonskih koles. To je reakcijska sila, ki jo imenujemo tudi adhezijska vlečna sila ali adhezija.

To silo označujemo z črko F_a in je zanjo značilno, da v nasprotju z vlečno silo F_o ta z naraščajočo hitrostjo upada počasi. O adhezijski sili ali adheziji, govorimo, ko neko telo (kolo) nima hitrosti nasproti drugemu telesu (tirnici). Pri tem se molekule enega telesa lepijo na molekule drugega telesa. To se pojavlja pri čistem kotaljenju saj točka dotikališča kolesa nima hitrosti nasproti tirnici. Adhezijska sila oziroma adhezija je odvisna od teže s katero kolo deluje na tirnico in od adhezijskega

koeficienta. Smer adhezijske sile je vedno nasprotna akcijski sili. Efektivno vleko in prav tako tudi efektivno zaviranje imamo, kadar je adhezijska sila večja od akcijske sile $F_a > F$. Kakor hitro postane akcijska sila večja od adhezijske sile $F > F_a$ nimamo več efektivne vleke niti efektivnega zaviranja, kar ima pri vleki za posledico zdrs kolesa, pri zaviranju pa blokado kolesa. Adhezija je pogoj za vzdrževanje vlečne sile, pri čemer je za njen obstoj postavljen naslednji mejni pogoj: $F_0 \leq \psi \times G_a = F_a(N)$, pri čemer je:

- F_0 – vlečna sila na obodu pogonskega kolesa,
- ψ – adhezijski koeficient,
- G_a – adhezijska teža pogonskega kolesa, ki deluje na pogonsko kolo,
- F_a – adhezijska vlečna sila ali adhezija.



Slika 7: Nastanek adhezijske vlečne sile
(Vir: Franc Širec, *Dinamika vleke*; Maribor 2003)

3.2.5 ADHEZIJSKA TEŽA

Adhezijska teža je tista teža, ki odpade na pogonska kolesa pri vleki in na zavirana kolesa pri zaviranju. Pri lokomotivah je adhezijska teža enaka lastni teži. Vlečna sila ne more biti večja od nekega dela adhezijske teže oziroma mase vlečnega vozila, ki odpade na pogonska kolesa. Za večjo vlečno silo mora imeti vlečno vozilo poleg močnejšega pogona tudi večjo adhezijsko težo.

3.2.6 ADHEZIJSKI KOEFICIENT

Adhezijski koeficient je dejansko torni koeficient med kolesom in tirnico in ga lahko primerjamo s statičnim tornim koeficientom μ_0 oziroma tornim koeficientom pri mirovanju dveh stikajočih se teles (koeficient lepenja). Adhezijski koeficient pa je enak statičnemu tornemu koeficientu le pri mirujočem kolesu. V trenutku, ko se začne kolo kotaliti pa to značilnost izgubi, koeficient μ_0 postane z začetkom kotaljenja kolesa adhezijski koeficient Ψ , če je kotaljenje kolesa brez drsanja, v nasprotnem primeru pa postane znani dinamični torni koeficient μ , ki je manjši od adhezijskega koeficienta.

Adhezijski koeficient je odvisen od veliko faktorjev in vplivov, pri čemer so glavni:

- hitrost,
- stanje stičnih površin,
- obdelanost stičnih površin in
- velikosti stičnih površin.

Značilnost adhezijskega koeficienta je, da rahlo upada z višanjem hitrosti, kar istočasno pomeni, da je največji pri mirujočem stanju koles. Vpliv hitrosti na adhezijski koeficient oziroma na njegovo slabšanje se lahko močno omili z brizganjem posebno prirejenega peska med stične površine koles in tirnic. Z brizganjem peska se lahko poveča adhezija pri vlažnih ali zamaščenih površinah koles in tirnic tudi do 35 %, medtem ko je pri suhih površinah vpliv peska negativen.

Torni koeficient μ_0 ima pri mirovanju pogonskih koles oziroma v trenutku speljave pri običajnih pogojih naslednje srednje vrednosti:

- na suhih in čistih stičnih površinah, 0,30–0,35,
- pri posipanju peska na suhe in čiste stične površine 0,34–0,40,
- na vlažnih tirnicah 0,20–0,24 in na
- na zamaščenih tirnicah ali kolesih 0,15–0,20.

Meritve so pokazale, da je adhezijski koeficient tem večji, bolj fino sta obdelani obe stični površini, kar si razlagamo tako, da zelo fino obdelani stični površini omogočata lepljenje velikega števila molekul enega telesa (kolo) z molekulami drugega telesa (tirnica). Prav tako k boljšemu adhezijskemu koeficientu pripomorejo velike stične površine dveh teles, ki omogočajo lepljenje velikega števila molekul z velikim številom molekul drugega telesa.

3.3 PASIVNE SILE PRI GIBANJU VLAKA

Pri vožnji vlaka nastajajo tudi sile, ki ovirajo njegovo gibanje ali delujejo v nasprotni smeri od njegove vožnje oziroma delujejo v nasprotni smeri od vlečnih sil. Te sile imenujemo pasivne sile, ker delujejo samo pri gibanju vlaka ali sile uporov. Za izračun ali določitev (pri konstruiranju) potrebne vlečne sile vlečnega vozila (največja hitrost vožnje, masa vlaka, konfiguracija proge) moramo določiti tudi velikost voznih uporov, katere bo morala med vožnjo premagovati vlečna sila vlečnega vozila.

Upore vlakov in vlečnih vozil merimo v enakih enotah kot vlečne sile, torej v newtonih (N), označujemo pa jih z veliko črko W.

3.3.1 VRSTE VOZNIH UPOROV

Upori so odvisni od veliko faktorjev, kot so npr. konstrukcijske značilnosti vozil, vrste in mase vozil, konfiguracija proge in podobno. Upore delimo glede na čas in pogoje, pri katerih ti nastajajo med vožnjo vlaka. Upore razvrščamo v tri glavne skupine:

- osnovni ali stalni upori,
- občasni upori in
- dodatni upori.

3.3.2 OSNOVNI ALI STALNI UPOR

Osnovni ali stalni upori vplivajo na vožnjo vlaka takoj po začetku njegovega gibanja. Ti upori so neodvisni od konfiguracije proge, zato jih tudi obravnavamo kot upore na ravni (brez lokov) vodoravni (horizontalni) progi. Osnovni upori so dejansko upori, ki nastajajo v vozečih vozilih uvrščenih v vlak, torej upori vlečnih in vlečenih vozil. Te vrste upori so posledica delovanja:

- gravitacijskega pospeška,
- gnetljivosti oziroma trdote materialov, med katerimi je gibanje,
- gostote medija, v katerem je to gibanje.

Osnovni upor ima nasprotno smer delovanja akcijske sile, ter teži k zaustavitvi vozila. Pojavlja se na vseh tistih medijih, kjer prihaja do relativne hitrosti med dvema telesoma. To je:

- kotaljenju kolesa po tirnici,
- trenju pri drsnih ležajih,
- kotaljenja v kotalnem ležaju,
- trenju med vencem obroča in tirnico,
- trenju molekul zraka ob čelo in ob vse stranice gibajočega se telesa.

Vsoto vseh petih elementov osnovnega upora zapišemo v naslednji obliki:

$$W_{(v)} = A + B \times v + C \times v^2 \text{ [daN]}$$

Vrednosti osnovnega upora, dobimo s poskusi in sicer tako, da med vlečno vozilo in vozilo kateremu hočemo izmeriti vrednost osnovnega upora, dodamo dinamometer. Silo na dinamometru odčitavamo pri različnih hitrostih. Meritev se mora opravljati v premi in horizontali. Eksperimenti so pokazali, da so prvi trije segmenti osnovnega upora neodvisni od hitrosti in so zajeti v členu A . Četrty segment je linearno odvisen od hitrosti in je zajet v členu $B \times v$.

Peti segment je odvisen od kvadrata hitrosti in se odraža v členu enačba $C \times v^2$. V praksi se pri računanju drugi člen enačbe $B \times v$ in četrti segment osnovnega upora (trenje med vencem obroča in tirnico) izpusti. Tako dobimo nov zapis enačbe osnovnega upora, ki je: .

$$W_{(v)} = A + C \times v^2 \text{ (daN)}$$

SPECIFIČNI OSNOVNI UPOR

Upore, ki so sorazmerni masi vlečnih vozil ali vlakov imenujemo specifične upore, ki jih označujemo z malo črko w , merimo pa jih z N/t (newtoni na tono). Specifični osnovni upor je tista sila, ki jo povzroči ena tona vozila. Enačbo za specifični osnovni upor zapišemo v naslednji obliki:

$$w = \frac{W}{m_v} \left(\frac{N}{t} \right) \text{ ali } \left(\frac{daN}{t} \right)$$

- W – upor vozila ali vlaka (N) ali (daN),
- m_v – masa vlaka (t).

3.3.3 UPOR KOTALJENJA KOLESA PO TIRNICI

Pri kotaljenju koles po tirnicah nastajajo tlačne sile v navpični smeri na zgornji sestav tira. Zaradi teh sil se tirnice upogibajo podobno kot vsak dvostransko vpeti nosilec, istočasno pa nastajajo na stičnih površinah koles in tirnic različna trenja. Ti pojavi povzročajo izgube energije, ki se prenaša od vozečega vlaka na zgornji sestav tira. Tako nastale upore kotaljenja koles lahko imenujemo tudi tirni upori, ki jih predstavljajo upori kotaljenja zaradi:

- ugrezanja koles v tirnice,
- upogibanja tirnic,
- drsanja koles po tirnicah,
- udarcev koles po tirnicah.

3.3.4 UPOR KOTALJENJA ZARADI UGREZANJA KOLES V TIRNICE

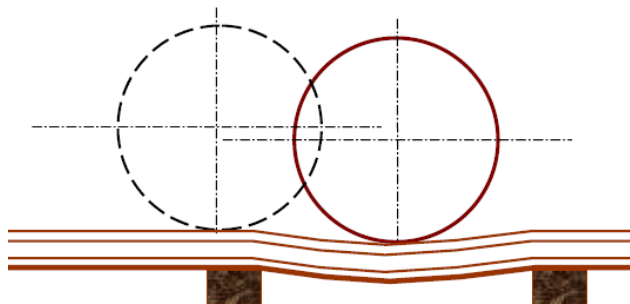
Vsako kolo železniškega vozila pritiska s silo teže na površino gornjega roba tirnice (GRT), pri čemer v vsakem trenutku nastajajo na stiku kolesa in tirnice elastične deformacije, kar pomeni, da se kolesa navidezno pogrezajo v tirnice z istočasnim lastnim deformiranjem tekalnega kroga. Zaradi delovanja sile teže, ki je posledica gravitacijskega pospeška in gnetljivosti materiala, kotaleče kolo gnete tirnico v smeri gibanja. Dokaz za tovrstno dogajanje je v obrabi glave tirnice. Kotalni torni koeficient je odvisen od:

- trdote materiala tirnic in
- trdote kotalnih površin koles.

3.3.5 UPOR KOTALJENJA ZARADI UPOGIBANJA TIRNIC

Zaradi upogibne elastičnosti tirnic in različne trdote tirne grede, se tirnice obnašajo kot elastični nosilci, ki se upogibajo pod težnostno silo kolesa. Upogibanje tirnic med pragovi se ponavlja v enakih presledkih, s čimer nastaja valovito nihanje koles v navpični smeri s premagovanjem strmine vsakega vala, katerega vrh se nahaja na tirnem pragu. Vrednosti teh uporov so na glavnih progah malenkostne, nekoliko bolj do izraza pa pridejo na stranskih progah, ki so konstrukcijsko slabše in slabo vzdrževane. Velikost teh uporov je odvisna od:

- razdalje med tirnimi pragovi,
- dimenzij oziroma tipa tirnic.



Slika 8: Prikaz upora kotaljenja zaradi upogibanja tirnic
(Vir. Franc Širec, *Dinamika vleke*; Maribor 2003)

3.3.6 UPOR KOTALJENJA ZARADI DRSANJA KOLES

Kolesi vsake kolesne dvojice železniških vozil sta trdno pritrjeni na os, zato je njuno kotaljenje po tirnicah zelo soodvisno, v nasprotju s kolesi cestnih vozil, pri katerih se vsako kolo lahko kotali neodvisno drugo od drugega. Zaradi olajšanja kotaljenja toge kolesne dvojice po tirnih lokih, ko mora kotaleče kolo na zunanji tirnici loka opraviti daljšo pot, so kotalne površine koles obdelane konično tako, da je premer na notranji strani kolesa manjši od premera proti sredini in sledilnemu grebenu. Prav toga vpetost koles na osi kolesnih dvojic ima za posledico kotaljenje, pri katerem se skorajda neprestano pojavlja drsanje in podrsavanje, ki je posledica:

- koničnosti tekalne površine koles,
- bočnega pomikanja kolesnih dvojic,
- različnih premerov koles,
- izrabljenosti sledilnih grebenov koles,
- nagnjenosti tira.

Na velikost uporov kotaljenja zaradi drsanja koles po tirnicah močno vpliva nihanje vozil v prečni smeri.

3.3.7 UPOR TRENJA ZARADI BOČNEGA POMIKANJA KOLES

Zaradi olajšanja kotaljenja toge kolesne dvojice po tirnih lokih, ko mora kotaleče kolo na zunanji tirnici loka opraviti daljšo pot, so kotalne površine koles obdelane konično tako, da je premer na notranji strani kolesa manjši od premera proti sredini in sledilnemu grebenu.

Osišča kolesnih dvojic so izvedena tako, da omogočajo določeno prečno oziroma bočno pomikanje kolesnih dvojic v levo in desno stran, kar je še posebej pomembno pri vožnji po tirih v lokih. Tak način izvedbe osišča kolesnih dvojic pri vožnji železniškega vozila po tirih v lokih, omogoča pomik kolesa na zunanjo stran loka ob notranji rob zunanje tirnice, s čimer se to kolo kotali po največjem premeru.

S pojavom bočnega pomikanja kolesnih dvojic se ne srečujemo samo pri vožnji po tirih v lokih, ampak se s tem pojavom srečujemo tudi pri kotaljenju koles po ravni progi, kar je posledica koničnosti tekalnih površin. Kotaljenje zaradi neenakih premerov koles povzroča neprestano bočno pomikanje kolesnih dvojic levo in desno, s čimer nastaja prečno drsanje koles po tirnicah. Poleg koničnosti tekalnih površin kolesa, je posledica prečnega drsanja koles še:

- spreminjajoča razdalja med tirničnima glavama tira,
- izrabljenost sledilnih grebenov koles in s tem večji bočni pomiki.

3.3.8 UPOR KOTALJENJA ZARADI RAZLIČNIH PREMEROV KOLES

Vzrok povečanega drsanja koles med kotaljenjem sta neenaka premera koles iste kolesne dvojice, ki sta lahko posledica nenatančne obdelave pri struženju profila tekalne površine (toleranca $\pm 0,5$ mm) ali neenakomerne obrabe. Neenakomerna obraba sledilnega venca, je posledica:

- stalne vožnje vozil po progi, na kateri prevladujejo loki iste smeri in

- prevelike razlike premerov koles po obdelavi zaradi česar nastane tako imenovano brušenje kolesa z manjšim premerom, kar hitro povečuje razliko premerov in slabša stanje koles.

3.3.9 UPOR KOTALJENJA ZARADI IZRABLJENOSTI SLEDILNIH GREBENOV

Pri kotaljenju koles njihovi sledilni grebeni sledijo notranjemu robu tirnic in tako vzdržujejo smer vožnje vozila po tiru. Dimenzije novih in dovoljena obraba sledilnih grebenov vozil so predpisane, s čimer se zagotavlja varna vožnja vlakov oziroma se preprečuje iztirjenje. Profil novega sledilnega grebena koles je konstruiran tako, da omogoča varno kotaljenje kolesa pri čim manjšem drsanju oziroma trenju ob notranji rob tirnice.

Kadar se sledilna grebena koles kolesne dvojice obrabita, se poveča njena sledilna širina, s čimer nastane možnost večjega bočnega pomikanja koles in s tem močnejše drsanje koles v prečni smeri.

3.3.10 UPOR KOTALJENJA ZARADI NAGNJENOSTI TIRA

Nagnjenost tira ima za posledico prečni zasuk kolesnih dvojic zaradi česa nastane drsanje na podoben način kot zaradi koničnosti tekalne površine ali različnih premerov koles.

3.3.11 UPORI ZARADI UDARCEV KOLES PO TIRNICAH

Udarci koles, ki jih slišimo med vožnjo vlaka so predvsem posledica:

- vdolbin na tirnicah, ki so posledica poroznosti materiala ali pa izbrusenosti,
- drsanja pogonskih koles vlečnih vozil pri speljavi vlakov ter drugih poškodb;
- ploščatih mest na tekalni površini koles, ki so posledica drsenja zaradi blokade koles pri zaviranju ali okvarah zavor;
- tirničnih stikov, ki spajajo dele tirnic;
- prekinjenih delov tirnic na kretnicah;
- morebitno počenih tirnic.

Največji upori nastajajo predvsem pri navozih koles na tirnične stike, kjer vsakokrat nastane neke vrste stopnica, ker se tirnica, na katero deluje težnostna sila kolesa, pogrezne, medtem ko je tirnica, na katero bo kolo šele navozilo v običajni neobremenjeni legi. Višina tako nastale stopnice je odvisna od vrste tirničnega stika, kakor tudi od trdote tirne grede. Mehki in zablateni tirnični spoji povzročajo močne udarce koles in velike odpore. Udarec pri navozu kolesa na prednjo privzdignjeno tirnico tirničnega stika povzroči močno silo, ki je usmerjena proti rotacijskemu in translacijskemu gibanju kolesa. Da pri tem ne gre za zanemarljive sile, se vidi na gornjih robovih tirničnih glav, ki so na spojih močno zakovani. Sila udarca se od kolesa prenese tudi na ostalo konstrukcijo vozila, ki zaradi tega prav tako izgublja kinetično energijo.

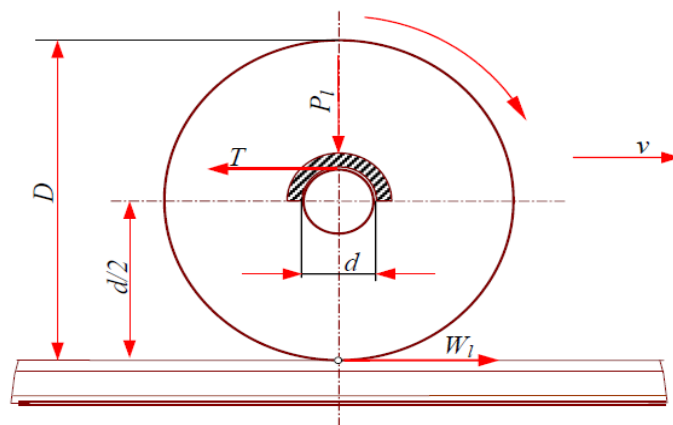
3.3.12 UPOR ZARADI TRENJA V DRSNIH LEŽAJIH

Vožnja vozila po tirnicah pomeni kotaljenje koles na osi oziroma kolesnih dvojic po tirnicah. Pri tem del teže gornje konstrukcije vozila in naklada, ki odpade na eno kolesno dvojico, predstavlja obremenitev osi oziroma osno tlačno silo, ki se razdeli na polovico kot obremenitev oziroma tlačna sila na posamezni ležaj. Pri drsnem ležaju nastane zaradi trenja, ki ga okarakterizira torni koeficient med osnim tečajem in ležajno skodelico, tangencialna torna sila na površini osnega tečaja. Upor trenja v ležajih je v največji meri odvisen predvsem od tornega koeficienta μ , katerega vrednost je odvisna od:

- materiala ležajnih skodelic (pri drsnih ležajih),
- kvalitete obdelanosti tornih površin,
- hitrosti vrtenja osi oziroma osnega čepa,
- površinskega tlaka oziroma obremenitve ležaja,
- kvalitete in kvantitete maziv,
- zunanje temperature.

Pri izpeljavi vlaka in pri nizkih hitrostih nastaja v drsnih ležajih skoraj suho trenje, pri katerem je torni koeficient zelo velik in povzroča velik upor ležaja. Ko se pojavi dovolj velika hitrost se olje zaradi svoje lastnosti vrine med čep ležaja in blazinico drsnega ležaja in ustvari oljni filter med obema elementoma drsnega ležaja. V fazi mirovanja tega oljnega filtra ni, zato se pri prehodu iz mirovanja v gibanje pojavi trenje med molekulami čepa in molekulami blazinice ležaja, ki je izredno veliko. Takoj, ko nastane hitrost se prej omenjeni oljni filter vrine med čep in blazinico in sedaj imamo trenje med molekulami čepa in molekulami olja, ter trenje med molekulami olja in molekulami blazinice, ki pa je mnogo manjše od suhega trenja. Torni koeficient pri suhih tornih površinah μ_0 ima približne srednje vrednosti:

- za ležajne skodelice z oblogo iz bele kovine znaša 0,22,
- torni koeficient za ležajne skodelice iz sive litine znaša 0,14.



Slika 9: Prikaz upora trenja v drsnem ležaju
(Vir: Franc Širec, *Dinamika vleke*; Maribor 2003)

Na železnicah je le še malo vozil z drsnimi ležaji, najdemo jih še predvsem n vlečnih vozilih. Na vlečnih vozilih večinoma še ni mogoča uporaba kotalnih ležajev pri pogonskih sklopih na pogonskih kolesnih dvojicah zaradi potrebe delitve ležajev (obesni ležaji vlečnih elektromotorjev, mehanični zobniški osni pogoni, smerni menjalniki), medtem ko so osni čepi kolesnih dvojic na vseh vozilih opremljeni že s kotalnimi ležaji.

3.3.13 UPOR KOTALJENJA V KOTALNEM LEŽAJU

Pri kotalnih ležajih se pojavlja upor na enak način kot pri drsnih ležajih, pri čemer se drsni torni koeficient zamenja s kotalnim tornim koeficientom. Kotalni torni koeficient je bolj odvisen od kotalnih materialov in kotalnih teles (kroglična, valjčna, sodčasta, iglična) kot od vrste maziv in pogojev mazanja. Tu gre za popolnoma analogen pojav kot pri kotaljenju kolesa po tirnici, s to razliko, da je kvaliteta materialov drugačna (materiali so trši). Kot pri kotaljenju koles pri tirnici tudi tukaj govorimo o hladnem kovanju, kar se izraža v obrabi kotalnih ležajev.

Za razliko od drsnih ležajev, povzročajo kotalni ležaji manjše odpore pri speljavi in nižjih hitrostih, kakor pa pri velikih hitrostih. To je predvsem posledica trenja maziv med kotalečimi telesi in kotalnimi površinami ter nezmožnost čistega kotaljenja kotalnih teles pri velikih vrtilnih hitrostih, pri katerih nastaja kombinacija drsnega in kotalnega trenja.

S preskusi je ugotovljeno, da so upori kotalnih ležajev v primerjavi z upori drsnih ležajev:

- manjši do 10 % pri speljavi vlaka po daljšem stanju vozil,
- manjši do 10 % pri nizkih hitrostih od 10 do 50 km/h,
- skoraj enaki pri hitrostih višjih od 50 km/h, z zanemarljivimi razlikami.

Poleg navedenega je prednost kotalnih ležajev pred drsnimi predvsem v njihovi daljši uporabnosti in enostavnejšem vzdrževanju, ki med uporabo skorajda ni potrebno.

3.3.14 ZRAČNI UPORI

Vsako telo, ki se giblje v zemeljski atmosferi mora pred sabo odrivati zrak, ki ga obkroža iz vseh strani. To fizikalno pomeni, da je vožnja vlaka tudi gibanje telesa skozi medij, pri čemer nastaja upor gibanja skozi medij, ki je v našem primeru zrak, zato lahko ta upor imenujemo tudi aerodinamični upor. Zračni upor pri vožnji vlaka se pojavlja v oblikah:

- zračnega tlaka na čelne površine vlaka,
- nadtlaka in podtlaka na ugreznjenih delih bočnih površin vlaka,
- trenja ob bočnih površinah vlaka,
- podtlaka na zadnjem delu oziroma sklepu vlaka.

Sila, ki nasprotuje gibanju vlaka v mediju je odvisna:

- od gostote medija (zrak),
- preseka gibajočega vozila,
- kvadrata hitrosti,
- dolžine vlaka.

$$W_{zr} = c_w \times p_{zr} \times A_{voz} \times v^2 \times l \text{ [daN]}$$

- W_{zr} – zračni upor (N),
- p_{zr} – gostota zraka,
- A – čelna presečna površina vlaka (m^2),
- v^2 – kvadrata hitrosti

- c_w – koeficient zračnega upora, ki je odvisen od oblike čelne površine vlaka.

S preskusi je ugotovljeno, da imata aerodinamični obliki čela in sklepa vlaka zelo velik vpliv na zračne odpore pri hitrostih nad 100 km/h, do te hitrosti pa se zračni upori le malo razlikujejo med vozili z ali brez aerodinamične oblike. Aerodinamična oblika čela in sklepa vlaka omogoča počasno razdvajanje zraka na čelni strani in ponovno zapiranje na sklepu, kar imenujemo laminarno gibanje zraka, ki pomeni gibanje zraka brez vrtinčenja. Slaba aerodinamična oblika vlaka povzroča pri vožnji vrtinčno ali turbulentno gibanje zraka, ki povzroča velike zračne upore.

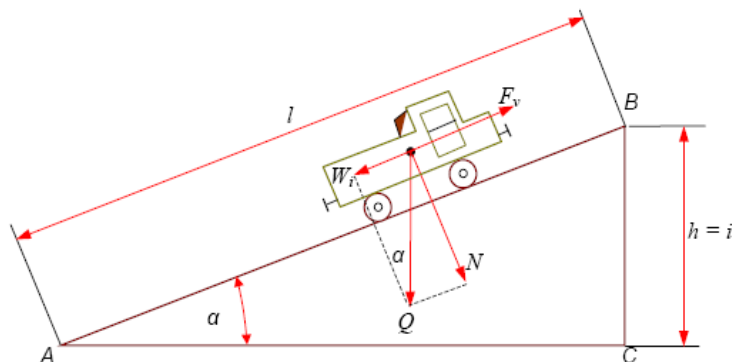
3.4 OBČASNI UPORI

Občasni upori ne delujejo proti gibanju vlaka stalno kot osnovni oziroma stalni upori, temveč le takrat, ko vlak pripelje na takšno mesto na progi, ki povzroča določen upor. Iz navedenega sklepamo, da so to upori proge ali progovni upori. Ti upori so:

- upor vzpona proge,
- upor tirnega loka,
- upor predora.

3.4.1 UPOR VZPONA PROGE

Progo sestavljajo odseki z različnimi nagibi (vzponi in padci), ki jih definiramo kot spremembe višinskih razlik v metrih med dvema točkama na razdalji $l = 1000$ m. Iz navedenega je določena merska enota nagiba promil (‰), za označevanje nagiba l pa uporabljamo malo črko (i).



Slika 10: Prikaz delovanja sil na vzponu
Vir: Lasten

Silo iz težišča vozila na vzponu razstavimo na tri komponente:

- W_i – komponenta odpora vzpona, ki je nasprotno usmerjena vlečni sili F_v ,
- Q – masa vozila ali gravitacijska teža,
- N – normalna sila ali teža na podlago.

Upor vzpona ima pri vožnji na vzponu nasprotno smer kot vlečna sila vlečnega vozila medtem ko pri vožnji na padcu pospešuje gibanje vlaka, zato moramo paziti na predznak tega upora, ki ga na vzponu označujemo s predznakom plus (+), na padcu pa s predznakom minus (—).

ODLOČILNI NAGIB PROGE

Za izračun potrebne zavorne mase vlakov (PZM) potrebujemo poleg podatka o skupni masi vlaka še podatek o skupnem zavornem odstotku. Ta se odčita iz ustreznih tabel Pravilnika o zavorah, varnostnih napravah in opremi železniških vozil in je odvisen od hitrosti, zavorne razdalje, vrste zaviranja in odločilnega nagiba proge. Pri popisu vlaka se ugotavlja dejanska zavorna masa (DZM). Ta mora biti večja od izračunane potrebne zavorne mase (PZM) ali vsaj enaka tej masi. Odločilni nagib proge ali njenega dela, je največji padec proge na dolžini najmanj 1000 m.

Podlaga za izračun odločilnega nagiba proge sta podatka o oddaljenosti dveh točk na progi ali progovnih odsekih in nadmorskih višinah teh dveh točk. Nagib proge je izražen v promilih (‰), njegova vrednost pa pomeni količnik med višinsko razliko začetne in končne točke in razdaljo med tema dvema točkama, oboje izraženo v metrih. Nagib proge izračunamo po obrazcu:

$$i_z = \frac{(h_1 - h_0)}{l} \times 1000 \text{ (‰)}$$

- i_z – nagib proge
- $(h_1 - h_0)$ – višinska razlika med točkama, za katera se ta nagib računa in
- l – dolžina med tema dvema točkama.

V kolikor je del proge z največjim nagibom daljši od 1000 m, temu pa sledijo ali so pred njim manjši nagibi, izračunamo odločilni nagib med dvema točkama z največjo višinsko razliko na razdalji 1000 m po obrazcu:

$$i_s = \frac{i_1 l_1 + i_2 l_2 + \dots + i_n l_n}{l_1 + l_2 + \dots + l_n} \text{ (‰)}$$

- i_s – skupni nagib proge,
- i_1 do i_n – velikost posameznih nagibov in
- l_1 do l_n – dolžina odsekov proge s posameznimi nagibi, pri čemer je $l_1 + l_2 + \dots + l_n = 1000 \text{ m}$

Če je na zavorni razdalji pred glavnim signalom padec, ki je krajši od 1000 m in je istočasno največji na tem delu proge, ga upoštevamo kot odločilni padec in ga posebej ne računamo.

ODLOČILNI UPOR PROGE

Odločilni upor proge se uporablja za določitev ali izračun mase vlaka, ki ga lahko lokomotiva posamezne vrste vozi na neki progi ali progovnem odseku s predvideno hitrostjo. Temu pravimo določanje največjih obremenitev lokomotiv. Upor proge na tono mase vlaka ali vozila je njen specifični upor, ki je izračunan kot vsota specifičnih odporov:

- nagiba (W_n),
- lokov (W_l)
- predora (W_p)

Specifični upor proge je vedno izražen z naravnimi števili. Merska enota zanj je dekanewton na tono (daN/t), kar predstavlja silo upora 10 N na vsako tono mase vlaka oziroma vozila.

Če je dolžina proge ali odseka proge z največjim vzponom večja od 1000 m, se pri izračunavanju odločilnega upora nagiba (W_n) upošteva največji vzpon na tej progi ali delu proge. Če pa je največji vzpon na progi ali delu proge krajši od 1000 m, pred njim ali za njim pa so odseki proge z manjšim nagibom, ravno progo ali padcem, se izračuna srednji ali reducirani upor nagiba tega dela proge na razdalji 1000 m. Ta upor izračunamo tako, da vsoto zmnožkov uporov in dolžin (vsota dolžin mora biti 1000 m) vseh zaporednih najbolj neugodnih odporov delimo s 1000.

3.4.2 UPOR TIRNEGA LOKA

Pri vožnji vlaka po tirnem loku nastaja poleg osnovnega upora še dodatni upor tirnega loka (v nadaljevanju: lok). Ta upor nastaja kot posledica:

- toge zveze koles kolesne dvojice,
- vzporednosti osi kolesnih dvojic v konstrukciji podvozja,
- delovanja centrifugalne sile.

Kolesna dvojica, ki je sestavljena iz osi in dveh na njo trdno navlečenih koles, zahteva pri vrtenju enako obodno hitrost oziroma enako prekotaljeno pot obeh koles, kar pa se pri vožnji po loku ne more izpolniti, ker je zunanja tirnica loka daljša kot notranja. Ta pojav se poskuša odpraviti z koničnostjo tekalne površine koles, s čimer se dosegajo različni kotalni premeri, pri čemer imajo kolesne dvojice možnost bočnih pomikov do 10 mm na ravni progi in do približno 50 mm v lokih. Pri tem velja pripomniti, da izkoristek tekalne površine kolesa ni popoln, ker se kolesna dvojica zaradi toge vpetosti v okvir vozila ali podstavnega vozička ne more postaviti popolnoma v smeri polmera loka.

Različni kotalni premeri koles in možnost bočnega pomikanja kolesnih dvojic zmanjšujejo spodrsavanje koles na notranji strani lokov in s tem obrabo sledilnih grebenov koles kakor tudi samih tirnic, vozila pa se lažje prilagajajo lokom. Teoretično se lahko odpravi drsanje le v lokih s premeri večjimi od 180 m. Obnašanje vozil pri vožnji po lokih je odvisno od njihovih konstrukcijskih značilnosti, kot so:

- medosna razdalja,
- vzmetenje med podstavnimi vozički in okvirjem vozila,
- konstrukcije čepov podstavnih vozičkov,
- vzmetenja kolesnih dvojic (listne in spiralne vzmeti, gumasto vzmetenje,
- blažilniki ipd.).

Za manjšanje uporov lokov in istočasno obrabe sledilnih grebenov koles in tirnic, železnice poskušajo blažiti trenje koles in tirnic z različnimi ukrepi. V ta namen se lahko pred začetkom lokov nameščajo mazalne naprave, na katerih kolesa odvezemajo mazalna sredstva, ali pa se mazalne naprave nameščajo na kolesa prvih kolesnih dvojic vlečnih vozil. Pri tem se pojavlja problem mazanja celotne tekalne površine koles in tirnic, kar zelo slabša adhezijski koeficient, zaradi česar nastaja problematičnost sposobnosti vleke, posebno če se takšno mazanje opravlja na vzponih proge. Moderne mazalne naprave na vlečnih vozilih se krmilijo elektronsko na osnovi radialnega pomikanja podstavnih vozičkov ali v funkciji časa oziroma prevožene poti. Iz zgoraj zapisanega lahko ugotovimo, da imajo na upor tirnega loka največji vpliv:

- polmer loka,

- širina tira,
- medosna razdalja kolesnih dvojic,
- masa vozil, konstrukcijske karakteristike vozil,
- izrabljenost tekalnih površin in sledilnih grebenov koles in
- izrabljenost tirnic.

Za praktične izračune upora lokov se uporabljajo empirične enačbe, s katerimi se upoštevata le glavna vpliva, ki sta polmer loka in širina tira. Splošna enačba za izračun specifičnega upora lokov je Rockel-ova enačba, ki ima obliko:

$$w_l = \frac{a}{R_l - b} \left(\frac{daN}{t} \right)$$

- w_l – upor loka,
- a in b – koeficienta odvisna od tirne širine,
- R_l – polmer loka.

Enačba za izračun specifičnega upora lokov na normalnotirnih progah s širino tira 1435 mm se glasi:

za glavne proge $w_l = \frac{650}{R_l - 55}$ in za stanske proge $w_l = \frac{650}{R_l - 30} \left(\frac{daN}{t} \right)$

Širina tira v (mm)	a	b
1435	650	55 (30)
1000	450	25
760	350	10
1000	200	5

Tabela 1: Prikaz vrednosti koeficientov a in b
(vir: Lasten)

Vožnja vozila po loku je podobna kroženju telesa po krožnici. Pri vožnji po loku torej deluje na vozilo centrifugalna sila, ki hoče izvreči vozilo iz loka. Mesto centrifugalne sile je v težišču vozila in jo določamo z enačbo:

$$F_c = \frac{m \times v^2}{R_l} (N)$$

- F_c – centrifugalna sila,
- m – masa krožečega telesa (kg),
- v – obodna hitrost (m/s),
- R_l – polmer loka (m).

Iz navedene enačbe sklepamo, da bo centrifugalna sila tem večja, čim manjši bo polmer loka pri enaki hitrost. Za preprečitev nedovoljenega zmanjšanja stabilnosti pri vožnji skozi lok in zmanjšanja vpliva centrifugalne sile, se prečni nivo tira zgradi poševno z dvigom oziroma nadvišanjem zunanje tirnice. Na ta način dobimo vodoravno komponento sile, ki je nasprotno usmerjena centrifugalni sili, katera vleče vozilo iz loka navzven.

Običajno se zunanja tirnica nadviša od 110 do 180 mm ter se v skladu s tem določi tudi največja hitrost. Najmanjše nadvišanje zunanje tirnice je 20 mm, če je izračun med 10 in 20 mm se izvede nadvišanje 20 mm. Če so v lokih vgrajene kretnice, je lahko nadvišanje največ 80 mm. Popolno izravnavo delovanja centrifugalne sile na vozila vlaka z nadvišanjem zunanje tirnice loka dosežemo le pri neki določeni hitrosti vlaka, pri kateri je vodoravna komponenta sile enaka centrifugalni sili. Nadvišanje zunanje tirnice v loku je odvisno od največje hitrosti na tej progi v_{max} .

Da bi se lahko povečala hitrost vlakov na obstoječih progah brez investicijskih vlaganj v spremembo progovnih parametrov, se je pojavil pristop k izdelavi motornih garnitur, katerih vozila se med vožnjo skozi tirne loke nagibajo. Vlaki z nagibno tehniko z dodatnim aktivnim ali pasivnim nagibanjem vagonskega groda na notranjo stran krivine tirnega loka, zmanjšujejo bočni pospešek, ki deluje na potnike.

3.4.3 UPOR PREDORA

Pri vožnji vlaka skozi predor je dogajanje podobno gibanju bata v valju. Pred vlakom nastaja visoki zračni nadtlak, za njim pa podtlak, pri čemer njuna razlika predstavlja dodatni upor proti gibanju skozi predor. Upor predora je odvisen:

- od prostega svetlobnega profila predora,
- od ekvivalentne površine vlaka in
- od hitrosti vožnje vlaka skozi predor.

Splošna enačba za skupni upor predora pa ima obliko:

$$W_p = 5 \times \frac{l_p}{K-1} \left(\frac{v}{10} \right)^2 \text{ (daN)}$$

- W_p – skupni upor predora,
- l_p – dolžina predora (km),
- v – hitrost vožnje vlaka (km/h),
- K – razmerje med svetlobnim profilom predora A_p ekvivalentno površino vlečnega vozila S_e ($K = S_e / A_p$),
- A_p – od 28 do 30 m² za enotirne predore,
- A_p – od 57 do 60 m² za dvotirne predore.

V zvezi s predori moramo še omeniti nevarnost za ljudi, ki se nahajajo v predorih, kadar skozi vozi vlaki z velikimi hitrostmi, ki v predoru ustvarjajo visoke zračne tlake. V ta namen se v predorih gradijo posebno zaprti prostori (niše), v katere se umakne vzdrževalno in drugo osebje, ki se nahaja v predoru.

3.4.4 DODATNI UPORI

K dodatnim ali ostalim uporom prištevamo vse druge upore, ki delujejo samo ob določenih pogojih ali v določeni fazi vožnje vlaka, ne moremo pa jih prištevati niti k osnovnim (stalnim ali voznim) niti k občasnim (progovnim) uporom. Ti upori so:

- upori speljave vlaka in
- upori zaradi vetra.

3.4.5 UPOR SPELJAVE VLAKA

Po dolgotrajnem stanju vozil, ki sestavljajo vlak, je začetni upor tudi brez hitrosti zelo velik. Do povečanega začetnega upora prihaja, ker so po daljšem stanju vozil površine osi in tečajev drsnih ležajev skoraj suhe, v normalno stanje pa preidejo šele po nekaj vrtljajih in, ko se po se po daljšem stanju vozil zniža temperatura ležajev, zaradi česar se zmanjša viskoznost maziv v ležajih, kar povzroča, da pade temperatura maziv tako drsnih kot kotalnih ležajev, kar ima za posledico slabe mazalne pogoje do porasta normalne temperature ležajev.

Velikost teh dodatnih uporov pri speljavi vlaka lahko znaša tudi od 15 do 25 daN/t, kar je tudi odvisno od letnega časa, najslabši so pogoji pri nizkih zimskih temperaturah. Na dodatni upor pri speljavi vlaka ima določen vpliv tudi dolgotrajno stanje koles vozil na istem mestu. Dolgotrajni medsebojni tlak kolesa in tirnice povzroča medsebojno deformacijo obeh, ki ima za posledico, da se kolo ugrezne v tirnico.

Nastala relativna kotanja v tirnici pod kolesom nudi določen upor v trenutku začetka kotaljenja kolesa pri speljavi. Iz zgoraj navedenega lahko ugotovimo, da na dodatni upor pri speljavi vlaka vplivajo naslednji elementi:

- trajanje stanja vozil oziroma vlaka na istem mestu (npr. po 15-minutnem stanju bi naj bil upor celo 5-krat večji);
- zunanje temperature;
- skupna masa vozil;
- vrsta maziv v ležajih;
- vrsta ležajev;
- pritegnjenost spenjalnih naprav med vozili.

Nepravilno uravnavanje vlečne sile lahko povzroča pretrganje spenjalnih naprav vozil, poškodbe tirnih sklopov (tirnic in kretnic), nepotrebno obrabo tekalnih površin pogonskih koles ali celo iztirjenje vozil.

V kolikor bi hoteli z lokomotivo pri speljavi vlaka premakniti vse vagonne hkrati, bi lokomotiva za premagovanje uporov potrebovala zelo veliko vlečno silo na vlečnem kavljju. Pri speljavi vlaka se vagoni premaknejo postopno drug za drugim proti sklepu vlaka, pri čemer se zaradi premaknitve, vsakemu vagonu zmanjša odpor speljave, z njegovo takoj nastalo kinetično energijo pa pomaga povleči tudi naslednji vagon.

3.4.6 UPOR ZARADI VETRA

Veter povzroča dodatne zračne upore, ki so odvisni od hitrosti in smeri gibanja vetra in dodatne upore kotaljenja. Z delovanjem vetra, nastane večji zračni tlak na čelne površine vozil in močnejše trenje zraka na bočnih površinah vlaka. Povečan bočni tlak izriva vozila ob nasprotno tirnico, kje nastaja dodatno trenje koles, ki povečuje upore kotaljenja.

4 VLEČNI MOTORJI ELEKTRIČNIH VLEČNIH VOZIL

4.1 SPLOŠNO O ELEKTRIČNIH VLEČNIH MOTORJIH

Osnovni pogonski stroji vsakega električnega vlečnega vozila, so vlečni motorji. V vlečnih motorjih se od zunaj dovedena električna energija spreminja v mehanično delo, ki se prenaša preko prenosnika moči (običajno zobniškega) na pogonske kolesne dvojice. Stalna mehanična povezava vlečnih motorjev s pogonskimi kolesnimi dvojicami ima za posledico neposredni vpliv vlečnih motorjev na elektro mehanske in vlečne karakteristike vlečnih vozil. Pri tem morajo vlečni motorji izpolnjevati tudi zahteve, ki jih postavljajo vlečni pogoji, uravnavanje hitrosti vožnje in ekonomičnost uporabe.

Vlečna moč električnega vlečnega vozila je odvisna od moči vgrajenih vlečnih motorjev oziroma je enaka vsoti (v kW) trajne moči vseh pogonskih vlečnih motorjev. Moč vlečnih motorjev je odvisna od produkta priključene napetosti in jakosti toka, ki ga motorji odvzemajo iz vlečnega omrežja. Zaradi električnega sistema napajanja vlečnih vozil, ki je v Sloveniji z enosmerno nazivno napetostjo 3000 V, se za pogon električnih vlečnih vozil uporabljajo:

- vlečni motorji na enosmerni tok,
- trifazni asinhronski vlečni motorji

Konstruktivske in elektrotehnične lastnosti vlečnih motorjev morajo biti takšne, da so pri njihovem izkoriščanju v največji možni meri zagotovljeni:

- stabilnost delovanja v odvisnosti od karakteristike $M = f(n)$,
- sposobnost paralelnega delovanja z enakomerno porazdelitvijo moči,
- vzdržljivost na kratkotrajne preobremenitve,
- možnost elektrodinamičnega zaviranja,
- konstrukcija, ki omogoča enostavno vzdrževanje.

4.1.1 TOPLOTNI KRITERIJI VLEČNIH MOTORJEV

Toplota, ki nastaja v električnih strojih natančneje v njihovih navitjih, kjer nastajajo tako imenovane izgube v bakru, stroje pa segrevajo še izgube v železu zaradi histereze in vrtničnih tokov je sorazmerna toku, ki teče skozi nje in se pri naraščanju toka povečuje z njegovim kvadratom. Odvajanje toplote iz strojev se opravlja z umetno cirkulacijo atmosferskega zraka s pomočjo ventilatorjev, gnanih z lastnimi rotorji (odvisno lastno hlajenje) ali z drugimi elektromotorji (neodvisno tuje hlajenje). Temperatura električnega stroja narašča tako dolgo, dokler se proizvedena toplota ne izenači z oddajano toploto.

Pri obratovanju vlečnega motorja poleg že omenjenih toplotnih izgub poznamo še:

- električne izgube (izgube v statorskem navitju in železu) in
- mehanske izgube (izgube v ležajih in trenju molekul zraka ob obod rotorja).

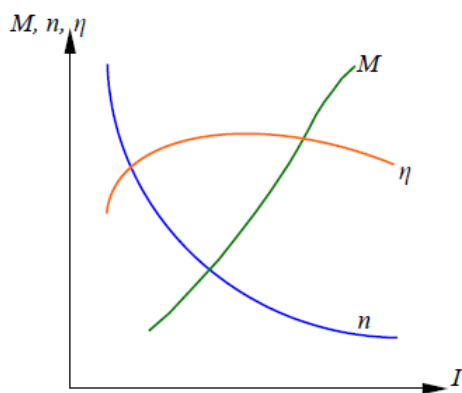
Značilno za električne izgube je, da z naraščanjem toka naraščajo z kvadratom tudi električne izgube, mehanske izgube pa zaradi zmanjševanja obodne hitrosti rotorja in posledično manjšega trenja molekul zraka upadajo. Z upadanjem električnega toka električne izgube upadajo mehanske pa naraščajo.

Jakost toka električnih strojev, pri kateri nastane na meji dovoljene temperature izolacije ravnotežje med segrevanjem in hlajenjem, se imenuje trajni tok električnega stroja. Tok, pri katerem se hladen električni stroj v eni uri segreje do mejne temperature, se imenuje enourni tok. Če je stroj že bil segret, potem se ne sme obremeniti z enournim tokom celo uro. Za posamezne vrste vlečnih vozil določajo proizvajalci tudi polurni in četrt urni (15 minutni) tok oziroma obremenitev, odvisno od dobavnih zahtev kupca vlečnih vozil. Vlečne sile, določene po toplotnih kriterijih se označijo tudi v vlečnih karakteristikah električnih vlečnih vozil.

Vlečni motorji se za kratek čas 3 do 6 minut lahko obremenijo z znatno večjim tokom (cca 70 %) od trajnega toka. Ta znatno večji tok zelo hitro segreje vlečni motor. Tako veliki tokovi so zagonski tokovi, ki se pojavijo predvsem pri speljavi težjih vlakov z lokomotivami ali pri močno pospešeni speljavi elektromotornih vlakov. Če se navedeni tokovi pomnožijo z nazivno napetostjo, se dobi trajna, enournna in speljavna električna moč. Trajna moč električnega vlečnega vozila je istočasno njegova nazivna moč.

4.2 DELOVANJE VLEČNIH MOTORJEV NA ENOSMERNI TOK

Na električnih vlečnih vozilih z vlečnimi motorji na enosmerni tok se uporabljajo vlečni motorji z zaporednim vzbujanjem ali zaporedno vezani (serijski) elektromotorji. Karakteristika te vrste elektromotorjev se najbolj približuje zahtevam železniške vleke, če pa se pojavi podobna karakteristika pri drugih vrstah električnih strojev, se večkrat poimenuje kar kot "zaporedna ali naravna karakteristika" po teh motorjih.



Slika 11: Karakteristike zaporednega motorja
(Vir: Franc Širec, *Dinamika vleke*; Maribor 2003)

Iz karakteristik motorja je razvidno, da se vrtilni moment (M) enostavno regulira, število vrtljajev (n) se menja po zaporedni karakteristiki, medtem ko se izkoristek (η) zadržuje na največji vrednosti v širokem obsegu delovanja.

4.2.1 REGULACIJA VLEČNIH MOTORJEV NA ENOSMERNI TOK

Vlečna sila in hitrost vlečnih vozil z vlečnimi motorji na enosmerni tok se regulirata z:

- uravnavanjem napetosti na njihovih priključkih z vključitvijo preduporov,
- s spremembami vezav in
- s slabljenjem magnetnega pretoka glavnega vzbujanja.

Višina napetosti na priključkih vlečnih motorjev se uravnava s predupori in z njihovo zaporedno, zaporedno-vzporedno in vzporedno vezavo v vlečni tokokrog. S vključitvijo preduporov v vlečni tokokrog se uravnava višina napetosti predvsem pri zagonu vlečnih motorjev oziroma pri speljavi vlaka, ko se rotorji še ne vrtijo in bi bila pritiska napetost iz voznega omrežja tudi za zaporedno vezane motorje previsoka.

Uravnavanje napetosti s predupori pri zagonu vlečnih motorjev oziroma pri speljavi povzroča zelo velike izgube energije. Ta se sprošča v obliki toplote, ki se mora intenzivno odvajati. Kljub prisilnemu odvajanju toplote pa predupori ne bi dolgo zdržali tolikšne toplotne obremenitve, zato je treba po naraščanju hitrosti predupore čim prej izključiti iz vlečnega tokokroga.

Slabljenje magnetnega polja med magnetnimi poli elektromotorjev dosežemo z vključenjem vzporednih (shuntov – šentov) uporov k magnetilnim statorskim navitjem ali z odcepljanjem oziroma premostitvijo števila ovojev magnetilnih navitij, kar se v praksi imenuje odcepno slabljenje. Slabljenje magnetnega polja oziroma šentiranje ima na delovanje vlečnih motorjev sledeče vplive:

- pri enakem toku skozi vlečni motor se vrtilni moment šentiranega motorja zmanjša; torej, če mora šentirani vlečni motor oddajati enak vrtilni moment kot pred šentiranjem, se mora povečati tok skozi rotor,
- pri enakem številu vrtljajev odvzema šentirani vlečni motor večji tok in oddaja večji vrtilni moment,
- moč, ki jo daje vlečni motor v obeh primerih je približno enaka, ker je sorazmerna velikosti vrtilnega momenta in števila vrtljajev,
- stopnja izkoristka se pri velikih obremenitvah komaj razlikuje od izkoristka pri polnem polju, vendar se izkoristek z manjšanjem obremenitve slabša, ker se z višanjem števila vrtljajev večajo ventilacijske izgube.

Moramo pa tudi upoštevati, da ima šentiranje vlečnih elektromotorjev razen cilja povečanja števila njihovih vrtljajev tudi cilj zmanjšanja magnetnega zasičenja železa statorskih magnetnih polov in rotorjev, saj bi v področju zasičenja železa večji magnetilni tok povzročal le večje izgube v bakru in železu, medtem ko se magnetni pretok ne bi več večal.

4.3 DELOVANJE ASINHRONSKIH VLEČNIH MOTORJEV

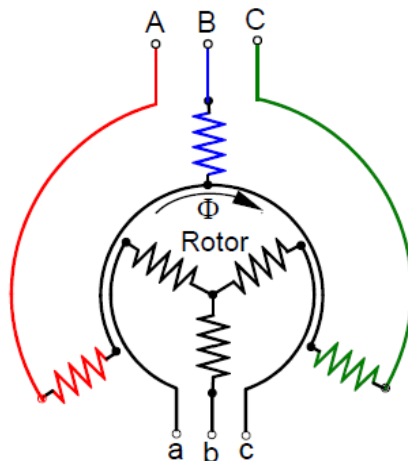
Asinhronski ali elektromotor, ki deluje na trifazni ali tako imenovani vrtilni električni tok, je bil vse od začetka električne vleke na železnicah želen za uporabo. Začetek obdobja množične uporabe asinhronskih elektromotorjev za moderno vleko v železniškem prometu, sega v leto 1971. Množično uporabo asinhronskih motorjev za vlečne motorje je omogočil razvoj polprevodnikov, predvsem diod in tiristorjev, ki prej niso bili uporabni v močnostni elektrotehniki.

Z nakupom novih vlečnih vozil, smo na Slovenskih železnicah dobili prva vlečna vozila z vgrajenimi asinhronskimi vlečnimi motorji v letu 2000. Tako se danes asinhronski vlečni motorji nahajajo na vlečnih vozilih serij:

- elektromotorna garnitura EMG 312,
- elektromotorna garnitura EMG 310,
- električna lokomotiva vrste 541.

4.3.1 SESTAVA IN DELOVANJE ASINHRONSKEGA MOTORJA

Stator asinhronskega motorja sestavlja trifazno navitje, nameščeno v utore, razvrščene po notranjem obodu železnega paketa, ki je sestavljen iz profiliranih lameliranih in med seboj izoliranih pločevin, kar tudi pomeni, da stator tega motorja nima izraženih polov, kot vsi prej obravnavani komutatorski vlečni motorji. Statorska navitja so lahko vezana v zvezdo ali trikot. Rotor asinhronskega motorja je lahko v dveh izvedbah in sicer kot tako imenovani kletkasti ali kratkostični rotor ali kot rotor z magnetilnimi navitji in drsnimi obroči. Za moderne vlečne motorje se uporabljajo kratkostični rotorji.



Slika 12: Prostorski raspored trifaznega navitja v statorju in rotorju asinhronskega motorja
(Vir: Lasten)

Osnovni dejavnik za delovanje asinhronskega motorja je vrtilno magnetno polje, ki ga sestavljata dva ali več izmeničnih prostorsko premaknjenih magnetnih polj. Povzročitelji teh magnetnih polj so izmenični tokovi, ki so med seboj fazno premaknjeni. Če so to trifazni tokovi, so fazno premaknjeni za 120° , kar je običajni največ uporabljeni električni sistem. Vrtilno magnetno polje torej proizvajata za 120° prostorsko premaknjena navitja, katerega smer vrtenja je odvisna od zaporedja priključitve faz. Vsaka medsebojna zamenjava priključkov dveh faz ima za posledico spremembo smeri vrtenja magnetnega priključka dveh faz in ima za posledico spremembo smeri vrtenja magnetnega polja.

Vrtilna hitrost magnetnega polja se imenuje sinhronska hitrost, kar pomeni sočasno ali hkratno hitrost, ki jo pogojuje frekvenca magnetilnih tokov. Njegova sinhronska hitrost je odvisna od:

- izvedbe statorskega navitja oziroma od števila parov polov,
- frekvence napetosti oziroma toka.

Po priključitvi napetosti na statorsko navitje, se v statorju vzbudi vrtilni magnetni pretok, ki teče v določeni smeri. V rotorskem navitju se v navitju vsake faze inducira napetost katere višina je odvisna od razmerja med številom ovojev navitij statorja in rotorja ter od frekvence. Tok v rotorskem navitju, ki se nahaja v magnetnem pretoku je odvisen od vrtilnega momenta rotorja v smeri vrtilnega polja. Če je zagotovljen dinamični vrtilni moment oziroma je vrtilni moment motorja večji od vrtilnega

momenta bremena se rotor začne vrteti v smeri vrtilnega magnetnega polja. V začetku, ko je število vrtljajev rotorja nizko, magnetno polje s sinhronsko vrtilno hitrostjo pogosto prehitava njegove vrtljaje in še vedno inducira visoko napetost, ki poganja tok v rotorskih navitjih. Z manjšanjem razlike med sinhronsko vrtilno hitrostjo magnetnega pretoka in dejanskim številom vrtljajev rotorja, se niža inducirana napetost v rotorskih navitjih, s čimer se manjša tok s tem pa tudi vrtilni moment. Ko postane vrtilni moment motorja enak vrtilnemu momentu bremena ni več dinamičnega vrtilnega momenta, motor več ne pospešuje, vrtilna hitrost rotorja pa je konstantna.

Če se rotor še razbremeni, se ponovno pospeši, vendar vrtilne sinhronske hitrosti magnetnega pretoka ne doseže, ker mora tudi v prostem teku premagovati lastni vrtilni moment odporov, ki jih povzroča trenje v ležajih in ventilacijske izgube. To pomeni, da število vrtljajev rotorja nikoli ne doseže sinhronskega števila vrtljajev magnetnega pretoka, temveč je vedno nekoliko nižje. Rotor se ne vrti s sinhronskim številom vrtljajev, temveč se vrti nesinhrono oziroma asinhrono, od koder izhaja tudi pojem asinhronski elektromotor.



*Slika 13: Sodoben električni vlečni asinhronski motor električne lokomotive 541
(Vir: Arhiv Holding Slovenske železnice, d.o.o)*

4.3.2 REGULACIJA IN ZAGON ASINHRONSKIH VLEČNIH MOTORJEV

Vlečni asinhronski motorji z kratkostično kletko, ki so vgrajeni, na vlečnih vozilih Slovenskih železnic se napajajo z izmeničnim tokom preko pretvornikov oziroma razsmernikov, ki se napajajo neposredno z enosmerno napetostjo 3000 V. Enosmerna napetost 3000 V iz voznega omrežja se v pretvornikih oziroma razsmernikih spremeni v trifazni sistem s spremenljivo napetostjo in frekvenco. Pretvorniki so izdelani s sodobnimi GTO) tiristorji. Iz tega izhaja, da se za njihov zagon in krmiljenje uporabljata dva načina:

- zagon z znižano napetostjo s polprevodniškim regulatorjem izmenične napetosti GTO ali IGBT,
- frekvenčni zagon.

4.3.3 PRIMERJAVA ENOSMERNIH IN ASINHRONSKIH MOTORJEV GLEDE NA NJIHOVO UPORABNOST ZA VLEČNE MOTORJE

Vrtilni moment zaporednega vlečnega motorja na enosmerni tok se lahko z uravnavanjem napetosti na njegovih priključkih z vključitvijo preduporov, spremembami vezav in s slabljenjem magnetnega pretoka glavnega vzbujanja najbolj približa idealni krivulji vrtilnega momenta, vendar je to približevanje mogoče le v določenih mejah, odvisnih od moči motorja.

Zaporedni vlečni motorji dobro izpolnjujejo pogoj stabilnosti pri speljavi, čeprav tudi pri teh lahko nastane spodrsavanje pogonskih kolesnih dvojic, zaradi česar je potrebna vgradnja proti drsne zaščite, ki pri spodrsavanju hitro sproži krmiljenje znižanja napetosti na sponkah vlečnih motorjev, da se vrtilni moment čim hitreje vrne v naravno karakteristiko in ponovno vzpostavi normalna regulacija.

Asinhronski vlečni motorji so manj primerni glede stabilnosti pri speljavi zaradi česar je pri njihovi uporabi še bolj poudarjena potreba za proti drsno zaščito. Glede primernosti vzporednega delovanja so zaporedni vlečni motorji v prednosti pred asinhronskimi vlečnimi motorji, medtem ko so le-ti primernejši glede možnosti preobremenitev. V današnjem času omogoča polprevodniško uravnavanje napetosti s tiristorji prav tako zvezno regulacijo vrtilnega momenta na adhezijski omejitvi in s tako imenovano tiristorsko regulacijo vlečne sile.

Trifazni asinhronski elektromotorji se vse bolj uporabljajo za vlečne motorje predvsem zaradi njihove enostavne konstrukcije, ker nimajo kolektorjev oziroma komutatorjev in ščetk, zaradi česar je njihovo vzdrževanje mnogo cenejše. Prav zaradi nizke cene izdelave in nizkih stroškov vzdrževanja vlečni asinhronski motorji nimajo prave konkurence, kar je tudi glavni razlog za njihovo vse bolj množično uporabo v železniški vleki.

4.4 PRIMERJAVA VLEČNIH ZMOGLJIVOSTI ELEKTRIČNIH LOKOMOTIV SERIJE 541 IN SERIJE 363

Električni lokomotivi serij 363 in 541 sta najmočnejši lokomotivi, ki vozita na progah Slovenskih železnic in se uporabljata najpogosteje za težje tovarne vlake ter potniške IC vlake v notranjem in mednarodnem prometu. V nadaljevanju je podana primerjava karakteristik lokomotiv omenjenih serij.

4.4.1 VLEČNE KARAKTERISTIKE ELEKTRIČNE LOKOMOTIVE 541

V letu 2006 je bila Slovenskim železnicam dobavljena prva izmed dvaintridesetih lokomotiv vrste 541 proizvajalca Siemens. Gre za štiriosne več systemske lokomotive z oznako 541 katerih masa znaša 87 ton. Nove lokomotive lahko vozijo v naslednjih sistemih električne vleke:

- enosmerni sistem 3 kV,
- enofazni sistem 25 kV, 50 Hz,
- enofazni sistem 15 kV, 16 2/3 Hz.

Lokomotiva je opremljena s štirimi sodobnimi asinhronskimi motorji z kratkostično kletko, katerih skupna moč znaša 6 MW in z vlečno silo 300 kN na obodu pogonskih

koles. K električnemu pogonu lokomotive spadata dva modula pretvornika toka z IGBT močnostnimi polprevodniki in trifaznimi asinhronskimi motorji, ki se napajajo preko teh. Oba pretvornika toka sta dodeljena vsakokrat enemu podstavnemu vozičku in napajata na tem mestu po dva vlečna motorja. Vsak vlečni motor se napaja s po enim pulznim razsmernikom z variabilno napetostjo in frekvenco. Krmiljenje in regulacijo pogonske opreme lokomotive prevzemata dve pogonski krmilni napravi. Pogonska krmilna naprava krmili vlečni pretvornik toka v skladu s programiranimi vrednostmi zavorne ali vlečne sile. Lokomotiva doseže največjo hitrost 200 km/h pri vleki potniškega vlaka.



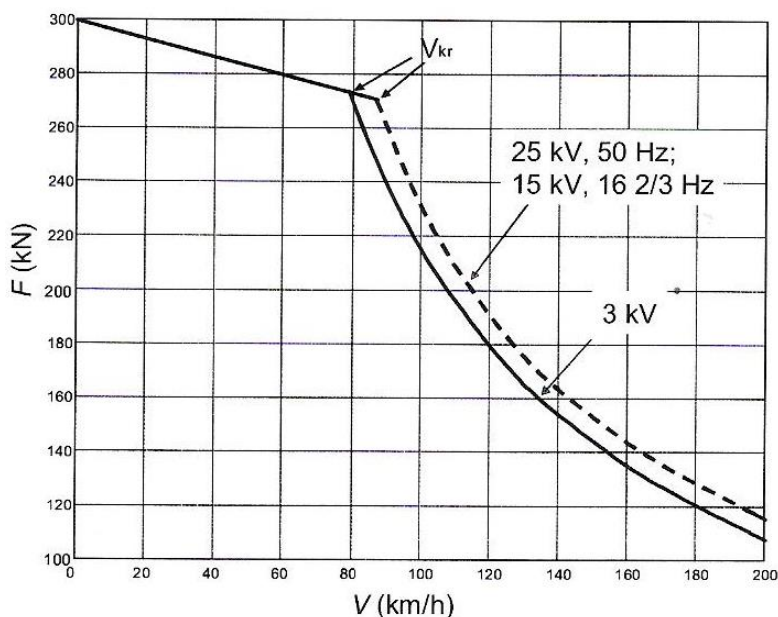
Slika 14: Večsistemska električna lokomotiva serije 541
(VIR: <http://vlaki.miniaturna-zeleznica.com/>)

Podobne lokomotive vozijo že kar nekaj let, tudi po avstrijskih, nemških, madžarskih in italijanskih železnicah. Pred njihovo izbiro in končnim nakupom je na Slovenskih železnicah potekalo njeno natančno preizkušanje. Preizkusi so potekali na progi Divača - Koper. Obremenitev omenjene lokomotive pri preizkusih je na koprski progi bila v območju od 727 t do 1856 t. Pri tem so se testirale speljave vlaka na največjem vzponu 26 ‰. Pri testiranju na omenjenem vzponu, se je lokomotiva izkazala za zelo zmogljivo in tehnično izpopolnjeno., saj je pri masi vlaka 900 t na tem odseku dosegla hitrost 70 km/h. V času preizkusa se je edina težava pojavila v energetskega sistema, saj se zaradi zastarelosti energetskega napajalnega sistema v času testiranja zaradi velike električne lokomotive ni smel na tem območju voziti nobeden vlak, ker je ta lokomotiva povzročila prevelike obremenitvene tokove in padce napetosti.

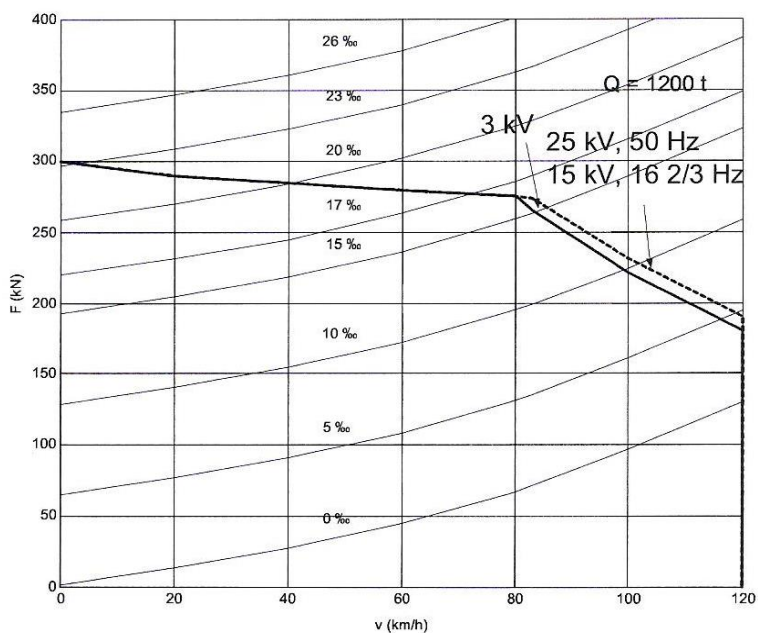
Vlečna karakteristika lokomotive serije 541 na sliki 15, prikazuje vrednost vlečne sile F_0 oziroma njeno spreminjanje na obodu pogonskih koles v odvisnosti od hitrosti in nam pove, da lokomotiva doseže pri speljavi največjo vlečno silo na obodu pogonskih koles 300kN. Pri pospeševanju do hitrosti 80 km/h vlečna sila upade na 270 kN v enosmernem načinu delovanja, pri izmeničnem načinu delovanja pa pri 83 km/h na 265 kN. Vrednosti 80 km/h in 83 km/h pomenita kritično hitrost lokomotive

pri največji vlečni sili. To pomeni, da bi trajna vožnja s polno vlečno silo s to hitrostjo povzročila pregretje električnih vlečnih motorjev.

Zaradi pogoja Evropske skupnosti, ki se nanaša na vleko tovornega vlaka z maso 1200 ton, je treba v diagram vlečne karakteristike vrisati vse upore z maso 1200 ton. Po vrisu vseh uporov v vlečni diagram lokomotive, se je izkazalo, da pri polni vlečni sili prekoračimo končno hitrost 80km/h na vzponu proge 17 ‰. Tak način vožnje je dopusten le kratek čas, ker lahko pride do poškodbe motorjev. Presečišče med vlečno karakteristiko in določeno krivuljo uporov določa največjo hitrost na tem vzponu, kar pomeni, da lahko vlak z maso 1200 ton na vzponu 17 ‰ vozi 70 km/h.



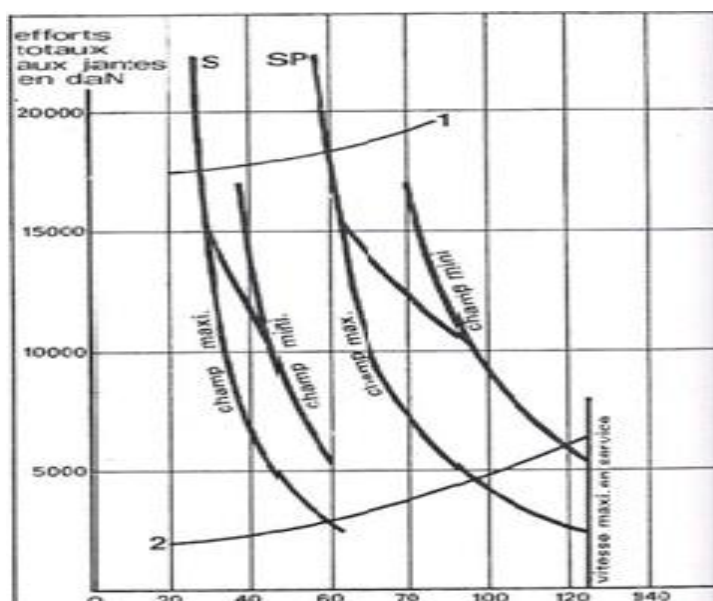
Slika 15: Vlečna karakteristika električne lokomotive 541
(Vir: Holding Slovenske železnice, d.o.o)



Slika 16: Vlečna karakteristika pri uporih vlaka z maso 1200 ton
(Vir: Arhiv Holding Slovenske železnice, d.o.o)

4.4.2 VLEČNE KARAKTERISTIKE ELEKTRIČNE LOKOMOTIVE 363

Decembra leta 1975 je francoska tovarna Alsthom dobavila v Slovenijo prve od 39 za takratni čas modernih šest osnih električnih lokomotiv serije 363. Lokomotiva serije 363 se na Slovenskih železnicah uporablja pretežno za vleko težkih tovornih vlakov na koprski progi. Do nedavnega je bila to najmočnejša električna lokomotiva na Slovenskih železnicah. Lokomotiva ima dva polno kompenzirana sinhronska vlečna motorja, katerega značilnost je, da gre za dva pol motorja na isti osi z dvema kolektorjema v sredini med rotorjema.

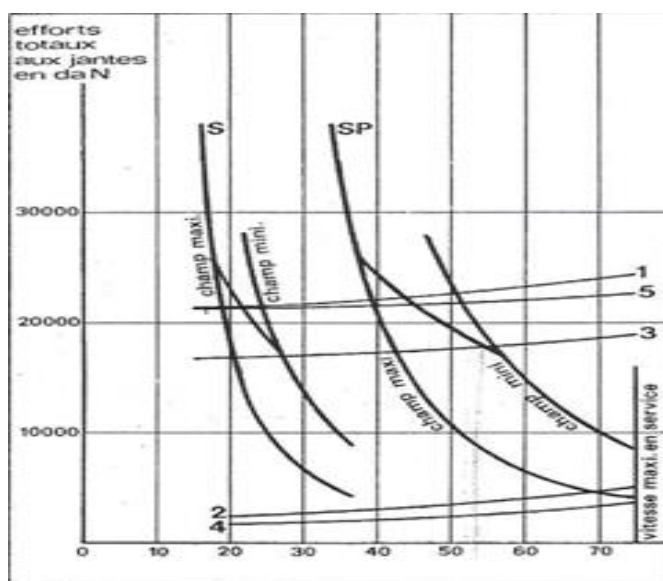


Slika 17: Vlečna karakteristika lokomotive v potniški prestavi
(Vir: Arhiv Holding Slovenske železnice, d.o.o)

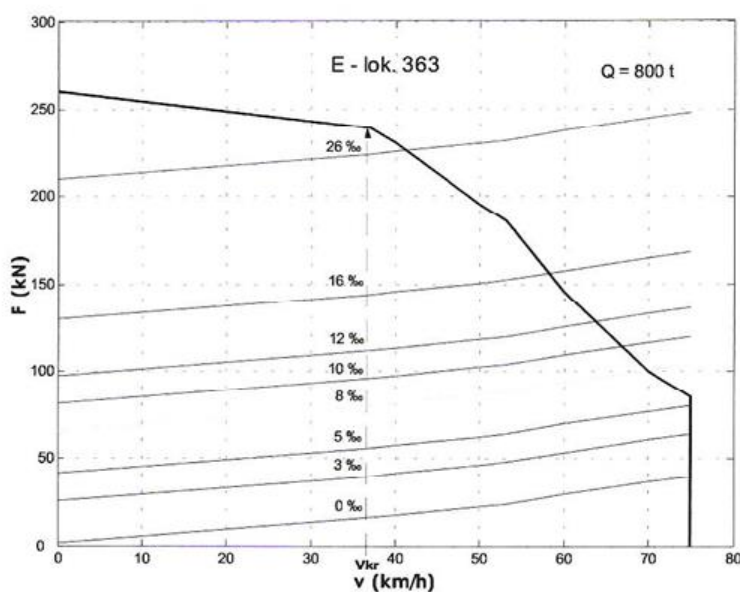


Slika 18: Električna lokomotiva serije 363
(Vir: <http://vlaki.miniaturna-zeleznica.com/>)

Največja moč lokomotive na obodu koles znaša 2750 kW. Regulacija vlečne sile in hitrosti vozila se vrši s prevezovanjem vlečnih motorjev v zaporedno in vzporedno vezavo in slabljenjem magnetnega pretoka ozirom šentiranjem. Njena posebnost je, da ima možnost prestavljanja prenosa moči na tire s pomočjo reduktorja. V primeru, da je potrebno vleči tovorni vlak se prestavi v tovarno prestavo, s tem se zmanjša njena končna hitrost (75 km/h) pridobi pa se na moči. V potniški prestavi pa je njena končna hitrost 125 km/h. V potniški prestavi znaša največja sila na obodu koles 15400 daN, v tovarni prestavi pa 25800 daN.



Slika 19: Vlečna karakteristika lokomotive v tovarni prestavi
(Vir: Arhiv Holding Slovenske železnice, d.o.o)



*Slika 20: Vlečna karakteristika pri uporih vlaka z maso 800 ton
(Vir: Arhiv Holding Slovenske železnice, d.o.o)*

Električna lokomotiva 363 ima v primerjavi z večsistemsko Siemensovo lokomotivo precej manjšo vlečno silo, ki znaša pri speljavi 260 kN. Njena kritična hitrost 37,5 km/h v tovorni prestavi in 63 km/h v potniški prestavi je precej manjša od Siemensove lokomotive. Njena majhna kritična hitrost predstavlja velik problem za propustnost proge.

S slike 20 razberemo, da zmore lokomotiva serije 363 na vzponu 16 ‰ vleči vlak z maso 800 ton s hitrostjo 70 km/h. Če to primerjamo z zmogljivostjo lokomotive 541 na istem vzponu, ugotovimo, da lokomotiva serije 541 zmore na enakem vzponu vleči v vlak z maso 1200 ton pri isti hitrosti.

5 ZAKLJUČKI

Železniška infrastruktura v Sloveniji je dobro vzdrževana, vendar funkcionalno zastarela. Rešitev je v sprejetju ambicioznega nacionalnega programa razvoja javne železniške infrastrukture, ki ga Slovenske železnice pripravljajo skupaj z Direktoratom za železniški promet in Direkcijo za izvajanje investicij v železniško infrastrukturo za obdobje od leta 2010 do leta 2023.

Prednost moderne železniške infrastrukture ni samo v večjih potovalnih hitrostih, ki se izražajo v obliki večjega pretoka blaga in potnikov. Njena velika prednost se odraža tudi v bolj ekonomični vožnji vlaka gledano iz vidika porabe energije. Prekomerna poraba energije predstavlja veliki izziv 21. stoletja. Z primernim trasiranjem prog, uporabo sodobnih gradbenih prijemov in materialov pri izgradnji spodnjega in zgornjega ustroja železniške proge ter nabavo sodobnih vlečnih sredstev se lahko bistveno prispeva k reševanju velikega izziva 21. stoletja, to je preveliki porabi energije.

V organizacijski enoti vleka, ki deluje v okviru Holdinga Slovenski Železnic, d.o.o, se pri izvajanju ukrepov za zmanjšanje porabe energije, posebno pozornost posveča kadrom, ki neposredno upravljajo vlečna vozila pri vožnji oziroma vleki vlakov. Le ti lahko z dobrim poznavanjem dinamike vleke, bistveno pripomorejo k gospodarnemu izkoriščanju železniških voznih sredstev, predvsem pa k varnemu in zanesljivemu železniškemu prometu.

Prav pri izvajanju ukrepov za zmanjšanje porabe energije se je pokazalo, da pomembno vlogo igra dinamika vleke znotraj katere se preučuje aktivne in pasivne sile pri vožnji vlaka, vlečne karakteristike vlečnih vozil in predlaga ukrepe za racionalnejšo izrabo energije.

Pri preučevanju sil se z vlečnimi izračuni ugotavlja različne tehnično-tehnološke in ekonomske parametre vleke vlakov, ki so pomembni za racionalizirano izkoriščanje vlečnih vozil v železniškem prometu. S temi izračuni lahko v glavnem ugotovljamo porabo pogonske energije pri vleki oziroma vožnji vlakov, vlečene mase vagonov vlakov z lokomotivami oziroma obremenitve lokomotiv, hitrost vožnje vlakov, vozne čase, zavorne poti vlakov ter razne diagrame, potrebne za analizo vlečnih in energetskih vrednosti. Z eksperimenti in meritvami se je dokazalo, da je za smotnejšo izrabo električne energije pri vleki vlakov na Slovenskih železnicah nujno izvesti naslednje ukrepe:

1. Nabaviti sodobna in zmogljiva vlečna vozila z asinhronskimi vlečnimi motorji, katerih prednost je, da imajo zaradi zvezne regulacije vlečne sile visoko kritično hitrost z možnostjo vračanja električne energije v vozno omrežje in opremo vlečnih vozil z varnostno napravo ECTS nivo 2 ali 3.
2. Nakupiti nove vagone istega tipa s čim bolj zaprtimi prehodnimi prostori in čim bolj zaprtim podvozjem zaradi vpliva bočnega vetra ki povzroča povečanje odporov kotaljenja zaradi drsanja koles ob tirnice, ker nastaja povečan tlak sledilnih vencev vseh koles ob rob zunanje tirnice.
3. Izgraditi novo sodobno železniško infrastrukturo ki vključuje:
 - Izgradnjo novih železniških prog v skladu z direktivo Evropske skupnosti o največjih vzponih na progi do 17 ‰ in majhnimi premeri lokov,
 - s preskusi je ugotovljeno, da je smotrno že za hitrosti vožnje v > 100 km/h zmanjšati širino tira iz 1435 mm na 1432 mm zaradi zmanjšanja vijuganja vozil in s tem kotov naletavanja sledilnih grebenov koles ob tirnici, s čimer se zmanjšajo tudi bočne sile, ki nastajajo na premem tiru,
 - opremiti proge z sodobno signalizacijo in varnostno napravo ECTS nivo 2 ali nivo 3.
4. Posodobiti zastarel in pomanjkljiv elektroenergetski sistem in zmanjšati in medsebojno oddaljenost električnih napajalnih postaj iz 30 km na 15 km.

Iz vsega navedenega sledi dejstvo, da posodabljanje stare in gradnja sodobne železniške infrastrukture, ter nabava novih vlečnih vozil, predstavlja za državo in Slovenske železnice veliki izziv v obliki zagotavljanja zadostnih finančnih sredstev, ki so potrebna za izgradnjo le te.

Za doseganje osnovnih zahtev, ki se postavljajo pri organizaciji železniškega prometa katerega del je tudi vleka vlakov, »da je prevoz potnikov in blaga varen, hiter in ekonomičen«, Slovenske železnice vlagajo veliko truda in znanja v zaposlen kader. Slovenske železnice za izpolnjevanje vseh zahtev iz naslova varnosti in ekonomičnosti plačujejo visoko ceno v obliki visokih obratovalnih stroškov, katerih del je tudi električna energija potrebna za vožnjo vlaka.

Za doseganje optimalne vleke vlakov, se pred slovenskimi železniškimi tehničnimi in drugimi strokovnjaki, ki s svojimi znanji in izkušnjami sodelujejo v procesu odvijanja železniškega prometa in vleke vlakov, pojavljajo veliki in novi izzivi.

LITERATURA IN VIRI

Knjige:

- Paunović, D. (1975). *Koriščenje i održavanje železničkih vozila*. Beograd.
- Šida, S. (1986). *Vuča vozova*. Beograd.
- Širec, F. (2003). *Dinamika vožnje vleke*. Maribor.
- Majer, Z. (2005). *Dinamika vleke*. Maribor.
- Kek, J. (2010/2011). *Organizacija železniškega prometa*. Kranj: B&B, izobraževanje in usposabljanje d. o. o.

Interno gradivo Slovenskih železnic:

- Navodilo o zaviranju vlakov (202.01). Ljubljana: 2008.
- Priročnik za strojevodjo (200.10). Ljubljana: 2008.
- Navodilo o progi (200.07). Ljubljana: 2011.
- Arhivsko gradivo Slovenskih železnic, d.o.o. Ljubljana: 2012.

Spletne strani:

- <http://vlaki.miniaturna-zeleznica.com/>, dostopno v aprilu 2012

KAZALO SLIK

SLIKA 1: OBMOČJE DEJAVNOSTI OE VLEKA.....	2
SLIKA 2: GRAF PREVOŽENE POTI IN ČASA PRI ENAKOMERNEM GIBANJU	4
SLIKA 3: NARAŠČANJE HITROSTI SORAZMERNO S ČASOM	5
SLIKA 4: PRIKAZ NASTANKA VLEČNE SILE PRI DIZELSKEM VLEČNEM VOZILU	9
SLIKA 5: PRIKAZ ODVISNOSTI VLEČNE SILE OD HITROSTI	10
SLIKA 6: PRIKAZ KRITIČNE HITROSTI V KOORDINATNEM SISTEMU	11
SLIKA 7: NASTANEK ADHEZIJSKE VLEČNE SILE	12
SLIKA 8: PRIKAZ UPORA KOTALJENJA ZARADI UPOGIBANJA TIRNIC.....	15
SLIKA 9: PRIKAZ UPORA TRENJA V DRSNEM LEŽAJU.....	18
SLIKA 10: PRIKAZ DELOVANJA SIL NA VZPONU	20
SLIKA 11: KARAKTERISTIKE ZAPOREDNEGA MOTORJA.....	27
SLIKA 12: PROSTORSKI RAZPORED TRIFAZNEGA NAVITJA V STATORJU IN ROTORJU	29
ASINHRONSKEGA MOTORJA	29
SLIKA 13: SODOBEN ELEKTRIČNI VLEČNI ASINHRONSKI MOTOR ELEKTRIČNE LOKOMOTIVE 541.....	30
SLIKA 14: VEČSISTEMSKA ELEKTRIČNA LOKOMOTIVA SERIJE 541.....	32
SLIKA 15: VLEČNA KARAKTERISTIKA ELEKTRIČNE LOKOMOTIVE 541	33
SLIKA 16: VLEČNA KARAKTERISTIKA PRI UPORIH VLAKA Z MASO 1200 TON	34
SLIKA 17: VLEČNA KARAKTERISTIKA LOKOMOTIVE V POTNIŠKI PRESTAVI	34
SLIKA 18: ELEKTRIČNA LOKOMOTIVA SERIJE 363.....	35
SLIKA 19: VLEČNA KARAKTERISTIKA LOKOMOTIVE V TOVORNI PRESTAVI.....	35
SLIKA 20: VLEČNA KARAKTERISTIKA PRI UPORIH VLAKA Z MASO 800 TON	36

KAZALO TABEL

TABELA 1: PRIKAZ VREDNOSTI KOEFICIENTOV A IN B.....	23
---	----

KRATICE IN AKRONIMI

a:	pospešek,
A:	čelna presečna površina vlaka (m^2)
a in b	koeficienta odvisna od tirne širine,
c_w :	koeficient zračnega upora, ki je odvisen od oblike čelne površine vlaka
daN:	dekanewton =10 newtnov
DZM:	dejanska zavorna masa
EMG:	elektromotorna garnitura za prevoz potnikov

- F: sila
- F_a : adhezijska vlečna sila ali adhezija.
- F_o : vlečna sila na obodu pogonskega kolesa
- F_v : vlečna sila na vlečnem kavljju
- G_a : adhezijska teža pogonskega kolesa, ki deluje na pogonsko kolo
- GRT: gornji rob tirnice
- GTO: močnostni polprevodniški element
- h_1-h_0 : višinska razlika med točkama, za katera se ta nagib računa
- Hz: enota za merjenje frekvence, število herzov (okrajšano Hz) je enako številu nihajev na sekundo
- I_z : nagib proge
- IGBT: Izolirani bipolarni tranzistor
- K: razmerje med svetlobnim profilom predora in ekvivalentno površino vlečnega vozila
- kv: kilovolt – merska enota za električno napetost
- kW: enota za merjenje moči $1kW=1000W$
- l_p : dolžina predora
- MW: enota za merjenje moči $1MW=1.000.000 W$
- N: Newton - enota za merjenje sile v mednarodnem sistemu enot
- N: normalna sila ali teža na podlago
- p: tlak v zavornih valjih
- PZM: potrebna zavorna masa
- ρ_{zr} : gostota zraka
- Q: masa vozila ali gravitacijska teža
- R_l : polmer loka.
- S: upor vzpona
- t: čas
- v: hitrost,
- V_0 : začetna hitrost,
- v^2 : kvadrat hitrosti
- W: osnovni upor,
- W_i : komponenta upora vzpona, ki je nasprotno usmerjena vlečni sili
- $W_{(loka)}$: upor loka – krivine,
- W_n : upor nagiba
- W_p : upor predora

$W_{(pos.)}$: upor pospeševanja oziroma pojemanja

W_{zav} : upor zaviranja

W_{zr} : zračni upor (N)

ψ : adhezijski koeficient

363: električna lokomotiva serije 363

541: električna lokomotiva serije 541