

USPINJAČA, specijalna tračnička željeznica koja nema pogonski agregat u vozilu, nego se pogon ostvaruje vučom pomoću užeta. Zbog toga se uspinjača ubraja u žične željeznice, odnosno stabilne žičare.

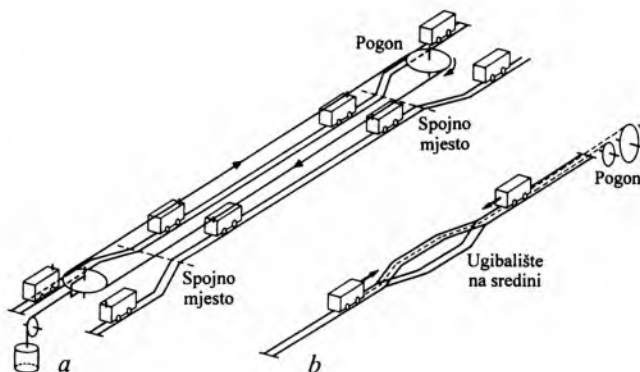
Uspinjačom se obavlja prijevoz putnika i robe na mjestima s povećanom frekvencijom ljudi u gradovima, rekreacijskim centrima ili u prirodi. Osim približno jednoličnog nagiba terena, za trasu se uspinjače drugi zahtjevi praktički ne postavljaju. Ona može ići i kroz tunele i zavoje, preko vijadukata i mostova ili potpuno podzemno, s usponom i većim od 100%. Vozila za putnike mogu biti manji vagoni ili cijele kompozicije kapaciteta 500 i više putnika. Upravljanje uspinjačom danas je uglavnom potpuno automatizirano, a sigurnost je zajamčena s tri neovisna kočna sustava.

Izgradnja novih uspinjača bila je tijekom XX. st. dulje vremena zanemarena, ali je nakon izgradnje podzemne uspinjače Zermatt–Sunnegga u Švicarskoj 1980. ponovno živnula, da bi se izgradnjom uspinjače Montjuic povodom Olimpijskih igara 1992. u Barceloni kapacitet uspinjača približio kapacitetu podzemnih željeznica. Izgradnjom podzemnih uspinjača pogon postaje neovisan o vremenskim prilikama, a uspješno se štiti i okoliš, što je posebno važno jer se uspinjače većinom grade na atraktivnim terenima u prirodi.

U starom su vijeku već postojali uređaji za transport na kosini (u Egiptu, Kini, Indiji). Tako Heron iz Aleksandrije opisuje napravu sličnu uspinjači za prijevoz ljudi i tereta na kosini. Mnogo kasnije (1588) slično vozilo spominje Ramelli, a također i Lorinis u djelu *Delle Fortificazioni* (Venecija, 1597). Prva uspinjača na pogon *parnim strojem* izgrađena je 1862. u Lyonu (trasa Rue Terme–Croix Rousse). Duljina je trase bila 489 m, a uspon 16%. Trasa je imala dvije paralelne pruge s kompozicijom od tri vagona na svakoj strani. Pogonsko je uže bilo pet puta omotano oko bubnja velikog promjera u strojarnici na vrhu trase, a brzina je vožnje bila 2 m/s. Prva uspinjača s *vodenim balastom* izgrađena je 1870. na trasi Bad Ems–Malberg. Kola su imala spremnik za vodu koji se na gornjoj postaji punio, a na donjoj praznio. Pogon se ostvarivao djelovanjem težine vode u vagonu koji se gibao niz trasu, bez dodatnog strojnog pogona, a brzina se regulirala ručnom kočnicom. Takav je pogon ekonomičan, ali su nedostaci glede brzine i mogućnosti upravljanja bili razlogom njegova napuštanja. U Švicarskoj je prva uspinjača za prijevoz ljudi puštena u pogon 1877, a povezivala je željezničku postaju Lausanne s lukom Ouchy. Duljina je trase 1506 m, visinska razlika 105 m, najveći uspon 11,6%, kapacitet 1500 osoba na sat u oba smjera, s tri međupostaje. Prvo uže promjera 34 mm trebalo je zamijeniti nakon 20 mjeseci (35 000 km vožnje). Sedamdeset godina potom uže istoga promjera traje 10 godina (380 000 km vožnje), što je pokazatelj poboljšanja kakvoće čelične užadi. Prvotni pogon Girardovom vodom turbinom zamijenjen je 1933. Peltonovom turbinom od 2×235 kW, s parnim strojem u pričuvu. Prvi pogon uspinjače u Budimpešti, izgrađene 1870, i Zagrebu, izgrađene 1890. (tabl. 1), bio je parni. Razvojem elektromotornog pogona napuštaju se ostale vrste pogona, pa se sve obnove starijih postrojenja i izgradnja novih izvode s elektromotorima na izmjeničnu ili istosmjernu struju, uz regulaciju pokretanja motora. Prva uspinjača samo s električnim pogonom izgrađena je u Birmenstoku u Švicarskoj 1888. godine.

Primjena i vrste uspinjača. Uspinjače se obično grade na terenu s takvim usponom koji onemogućuje primjenu željeznica s adhezijskim ili zupčaničkim pogonom. Gibajući se u suprotnim smjerovima, težine vagona djeluju kao protuteži i tako smanjuju potrebnu pogonsku silu. Pogonom se svladavaju samo otpori vožnje i razlika u opterećenju penjućih i spuštajućih vagona. Stoga je potrošnja energije za uspinjaču manja nego za ostale vrste brdskih željeznica. Moguća duljina trase ovisi o usponu i težini vagona s korisnim teretom, a ograničena je čvrstoćom užeta. Na duljim se trasama povećava utjecaj težine užeta na moguću duljinu trase, pa se tada, kao i u žičara, trasa dijeli na više posebnih pruga s prijelazima.

Uspinjače se, poput žičara, dijele prema načinu pogona na uspinjače s jednosmjernim gibanjem vučnog užeta (*kružni pogon*, sl. 1a) i na uspinjače s promjenljivim smjerom gibanja vučnog užeta (*povratni pogon*, sl. 1b).



Sl. 1. Uspinjača s kružnim pogonom (a) i s povratnim pogonom i ugibaldištem (b)

Kružni pogon obično se primjenjuje za teretne uspinjače. Vučno je uže neprekinuto i spaja pogonsku užnicu (užetno kolo s utovorom za vođenje) na gornjoj postaji (strojarnici) i povratnu užnicu na donjoj (nateznoj) postaji. Uže, za koje su pričvršćeni vagoni, giba se stalno u istom smjeru, čineći tako na jednoj strani uzlaznu, a na drugoj strani silaznu trasu, pa se jedna strana teretnih uspinjača naziva punom, a druga praznom stranom. Veza užeta s vagonima može biti s gornje strane (krovno uže) ili ispod postolja (podno uže). Veza je rastavljiva na spojnim mjestima pri gornjoj i donjoj postaji radi usmjeravanja vagona na potrebna mjesta.

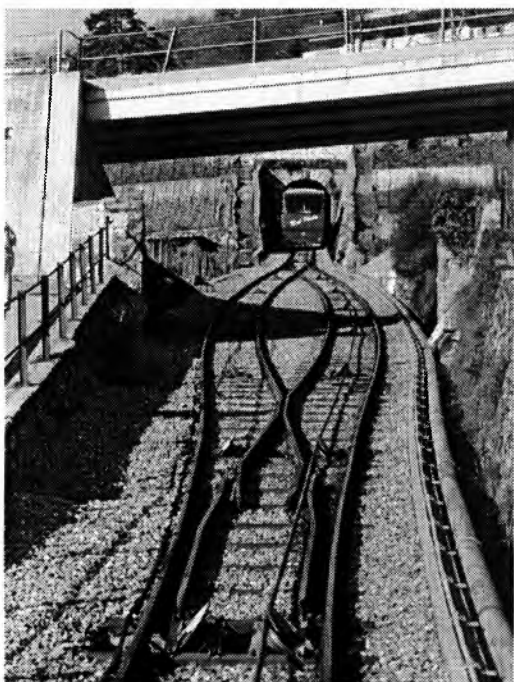
Tablica 1

OSNOVNE ZNAČAJKE NEKIH USPINJAČA

	Zagrebačka uspinjača	Zermatt–Sunnegga (Švicarska)	Vevey–Mont-Pèlerin (Švicarska)	Montjuic (Španjolska)	Tignes (Francuska)
Duljina trase (m)	66	1545	1585	750	3484
Visinska razlika (m)	30,5	698	418	75	932
Uspón (%)	52	maks. 63	13...54	maks. 18	18...30
Brzina (m/s)	1,5	10	4	10	12
Snaga motora (kW)	28,5	900 (do 1309)	125 (do 200)	2×555	2900
Promjer užeta (mm)	22	39	36	50	52
Vrijeme vožnje	55 s	3,3 min	12 min	2 min	6 min
Broj vagona u kompoziciji	1	2	1	2	2
Broj putnika u jednom smjeru	28	200	80	400	334 + pratilac
Kapacitet (osoba/h)	875	2500	260	8000	3000
Nosivost vagona (t)	2,24	16	6,4	32	26,8
Nadmorska visina donje postaje (m)	126	1599	394	~100	2100
Godina izgradnje/zadnje obnove	1890/1974.	1980.	1900/1993.	1992.	1993.
Pružni sustav	dvije pruge	jedna pruga s ugibaldištem u sredini			
		podzemna	4 međupostaje	70% u tunelu, sa zavojima	podzemna

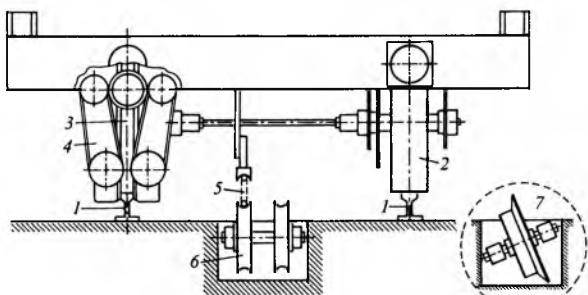
Kružne uspinjače mogu raditi neprekidno ili s prekidima, već prema potrebi i namjeni. Obično se grade s dvije odvojene trase, a iznimno, pri pravilnom razmaku vagona, može se postaviti jedna pruga s brojnim ugibalištima.

Povratni pogon uobičajen je za uspinjače za prijevoz ljudi. Vagoni voze izmjenice gore-dolje između krajnjih postaja, a povezani su vučnim užetom koje se pokreće pomoću pogonske užnice u gornjoj postaji (strojarnici). Pogonski motor pritom mijenja smjer vrtnje. Prve uspinjače s povratnim pogonom imale su dvije odvojene pruge, što se danas primjenjuje još jedino za uspinjače duljine do 100 m. Nakon pronalaska samoradne skretnice bez pokretnih dijelova (R. Abt, 1888), dovoljna je jedna vozna pruga za oba smjera s ugibalištem na sredini trase (sl. 2), koje omogućuje mimoilaženje vagona.



Sl. 2. Ugibalište uspinjače Vevey–Mont-Pèlerin

Vučno se uže polaže između tračnica na vodeće užnice (sl. 3), kojima je razmak $8 \dots 10$ m. Uže ne smije dirati podlogu, tako da najmanja udaljenost užeta od podloge može biti $50 \dots 60$ mm. Kroz skretnicu ugibališta uže se vodi ispod gornje razine tračnica.



Sl. 3. Vođenje vagona i užeta. 1 tračnice, 2 široki kotač bez vijenaca, 3 vodeći kotač s vijencima, 4 pružna brzohvatna kočnica, 5 vučno uže, 6 vodeća užnica na ravnom dijelu trase, 7 otklonska užnica (u zavoju)

Za veće uspone nije potreban natezni uređaj, jer se težinom kola postiže dovoljna sila na pogonskoj užnici. Time nestaje i potreba za protuužetom s donje strane kola, pa se takve uspinjače nazivaju i uspinjače s otvorenim užetom.

Profil trase i pruga. Najpovoljniji profil trase uspinjače s povratnim pogonom jest blaga konkavna parabola, koja se približava obliku prirodne lančanice užeta pod punim opterećenjem. Tada su otpori između užeta i vodećih užnica na tlu najmanji. Uže pritom ni pod najvećim opterećenjem ne smije izgubiti dodir s vodećim užnicama.

Odstupanje od pravocrtne trase postiže se tako da se u zavojima koso polože vodeće užnice s vijencima koji sigurno vode užu u zavoju (sl. 3). Prikladnim rasporedom vodećih užnica u zavojima treba postići njihovo što manje opterećenje. Prije se često odustajalo od projekata uspinjače upravo zbog preskupe izgradnje pravocrtne trase, no danas je trasa sa zavojima uobičajena. Tako je, npr., 61% trase druge dionice uspinjače Davos–Parsenn u zavojima.

Kotači vagona koji se kroz ugibalište kreću po unutrašnjim tračnicama široki su i bez vijenaca, dok su kotači na vanjskim tračnicama vodeći.

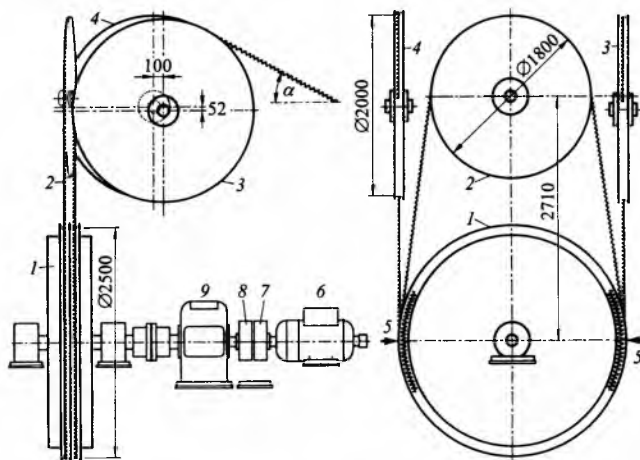
Pruga se općenito ne razlikuje od uobičajenih izvedbi željezničkog kolosijeka s tračnicama mase od $30 \dots 40$ kg/m. Pragovi su čelični, betonski ili drveni, na razmaku od $0,8 \dots 1,0$ m. Za uspone veće od 30% obvezna je betonska podloga pruge. Mostovi trebaju uz prugu imati staze za izlaz putnika i pristup vagonima.

Prekretnica u gradnji uspinjača već je spomenuta potpuno podzemna trasa. U srpnju 1993. u Francuskoj je puštena u pogon najnovija takva uspinjača (tabl. 1). Gradnja tunela trajala je nešto više od dvije godine, a napredovala je prosječno 12 m na dan. Karoserija vagona izrađena je od aluminija i poliestera, pa je masa vagona samo 20% veća od mase korisnog tereta. Vagoni uspinjača čelične konstrukcije teži su $2 \dots 3$ puta od njihove nosivosti. Za zagrebačku uspinjaču taj je omjer 2,25.

Širina kolosijeka najčešće je 1000 mm (Sunnegga) ili 1200 mm (Zagreb, Tignes, Montjuic). Prve uspinjače kroz tunele imale su, radi uštede, užu kolosijek (800 mm, Parsenn i Stoos u Švicarskoj), dok je uspinjača Marzilli u Bernu izgrađena s kolosijekom širokim samo 750 mm. Obje uspinjače grada Lausanne imaju normalnu širinu željezničkog kolosijeka od 1435 mm.

Vučno uže. Obično se upotrebljava paralelno pleteno, prameno čelično uže (v. *Prenosila i dizala*, TE 11, str. 115) s vlaknastom jezgrom i čvrstoćom žica od $1300 \dots 1800$ N/mm². Prekidna sila užeta treba biti osam puta veća od najveće proračunske vlačne sile koja se može pojaviti u normalnom radu uspinjače (faktor sigurnosti užeta $S \geq 8$). Naprezanje zbog savijanja i dodira drži se pod kontrolom tako da omjer promjera pogonskih, povratnih i otklonskih užnica (D) i promjera užeta (d) bude $D/d \geq 80 \dots 100$.

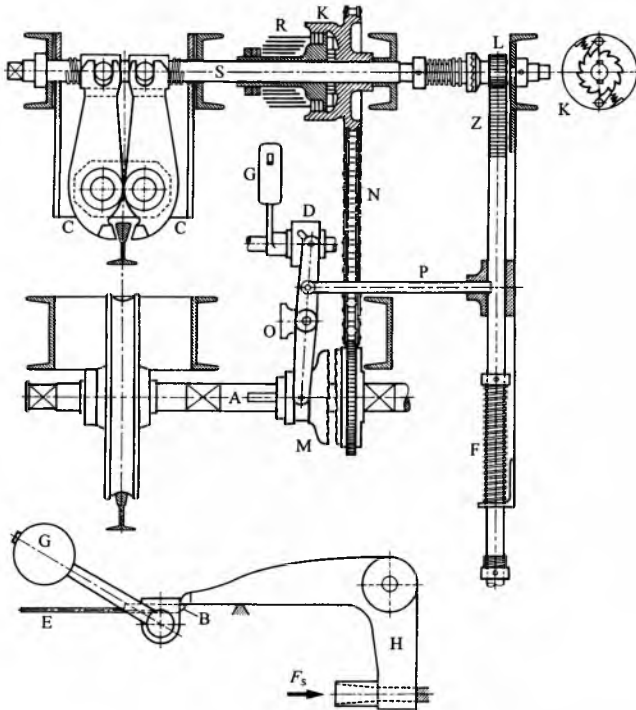
Kočnice i sigurnosni uređaji. Uspinjače su jedno od najsigurnijih prijevoznih sredstava zahvaljujući vlastitoj trasi i trima, međusobno neovisnim kočnim sustavima (sl. 4). Između motora i reduktora nalaze se dvije bubanjske čeljusne kočnice. To su redovita zaustavna kočnica za normalni pogon i manevarska kočnica. Manevarska se kočnica aktivira ručno iz upravljačke kabine i služi u prvom redu za namještanje vagona na pruži, a u normalnom se pogonu ne aktivira. Na pogonskoj se užnici nalazi sigurnosna zaustavna kočnica. Ona se aktivira pri prekoračenju brzine ($> 15\%$) ili dopuštenog puta, te ako redovita zaustavna kočnica zataji.



Sl. 4. Pogon zagrebačke uspinjače. 1 pogonska užnica, 2 protuužnica, 3 i 4 užnice, 5 sigurnosna zaustavna kočnica, 6 elektromotor, 7 manevarska kočnica, 8 redovita zaustavna kočnica, 9 reduktor

Na vagonu se nalazi pružna brzohvatna kočnica. To je klješta kočnica koja koči tako da obuhvati i stisne tračnicu. Ona se aktivira samostalno kada se sila u užetu smanji ispod određenog

najmanjeg iznosa (npr. ako pukne uže) ili kada se prekorači najveća dopuštena brzina. Pratilac je može aktivirati i iz vagona ako se iznenada pojavi prepreka na pruzi. Na slici 5 pokazana je kočnica u otkočenom položaju za vrijeme normalne vožnje. Vučno uže djeluje silom F_s na polugu H te je, preko zuba B, u ravnoteži s utegom G, umjesto kojeg može biti i opruga. Opruga F je napeta, ali zasun P sprečava gibanje zubne letve Z. Kočnica se aktivira ručno (izvlačenjem zuba B pomoću letve E) ili automatski, kada se sila u užetu previše smanji ili kada pukne uže. Pritom uteg G zakreće polugu M-O-D oko okretišta O, čime se izvlači zasun P i uključuje pandžasta spojka M. Izvlačenjem zasuna P, zupčasta letva Z pod djelovanjem opruge F, preko malog zupčanika L, brzo okreće kočno vreteno S, koje s protusmjernim navojima zatvara klijesta kočnice (u vremenu $\sim 0,1$ s). Istodobno se zbog vrtnje kotača giba i lanac N preko spojke M, ali sporije od gibanja pod djelovanjem opruge. Prestankom djelovanja opruge vreteno S okreće dalje lanac N preko zupčastog zadržaća K sve do prestanka vrtnje kotača. Takvim se rješenjem stezanje čeljusti stalno povećava sve dok se vagon ne zaustavi.



Sl. 5. Pružna brzohvatna kočnica. C pružna klijesta, H poluga vučnog užeta, F opruga za zatvaranje, R sigurnosna klizna spojka, N lanac, M pandžasta spojka, S kočno vreteno, K zadržaća

Oslobađanje kočnice i stlačivanje opruge obavlja se ručno. Preko posebnog poluzlja podiže se uteg, a pomoću ručice okreće se vreteno S, koje preko zupčanika L i zubne letve Z tlači oprugu F sve dok zasun P ne upadne u granični utor. Granična sila kočenja, a time i najveće usporenje pri kočenju, namješta se kliznom spojkom R.

Pružna kočnica djeluje brzo, ali ipak postupno, pa se izbjegava neugoda za putnike. Za više od jednog stoljeća rada uspinjača u Švicarskoj registrirana su samo dva puknuća užeta: 1909. i 1953. godine. Oba je puta pružna kočnica djelovala besprijekorno, bez posljedica za putnike i konstrukciju.

Uspinjače imaju signalne uređaje za registraciju brzine, položaja i smjera gibanja vagona. Nove ili obnovljene uspinjače obično rade s automatskim upravljanjem.

Pogonski mehanizam. Pogonski motor s reguliranim pokretanjem i kočenjem najčešće je istosmjerni poredni motor ili klizno-kolutni motor izmjenične struje. Uspinjače s tunelom ili s teško pristupačnim dijelom trase moraju imati pričuvni pogon. Preko spojke s bubnjevima za redovitu zaustavnu i manevarsku kočnicu te preko reduktora (sl. 4) prenosi se gibanje od motora do pogonske užnice. Kada je to potrebno, obuhvatni se kut na pogonskoj užnici udvostručuje pomoću protuužnice.

Proračun pogona. Različita opterećenja užeta i pogonskog mehanizma te njihova srednja vrijednost slijede iz analize četiriju kombinacija mogućih opterećenja, tj. s punim ili praznim vagonom, u vožnji uzbrdo ili nizbrdo. U analizu se uključuje pokretanje i zaustavljanje na postajama te prisilno kočenje. Za uspinjaču sa stalnim nagibom to je razmjerno jednostavna analiza gibanja tijela na kosini, za koje se uzimaju u obzir specifični otpor vožnje, ubrzanje pri pokretanju ($a_p \approx 0,3 \text{ m/s}^2$) i usporenje pri prisilnom kočenju ($a_k = 1,2 \text{ m/s}^2$ ili više). Za uspinjaču s promjenljivim nagibom i sa zavojima takva se analiza provodi po segmentima za koje se može uzeti da je nagib jednak srednjem nagibu promatranog dijela trase.

Dimenzioniranje užeta počinje izborom prikladne norme i materijala žica, čime su određene i sve značajke užeta. Za užad različitog promjera, ali s istom oznakom norme i od istog materijala, vrijedi da je lomna sila užeta:

$$F_l = k_1 d^2, \quad (1)$$

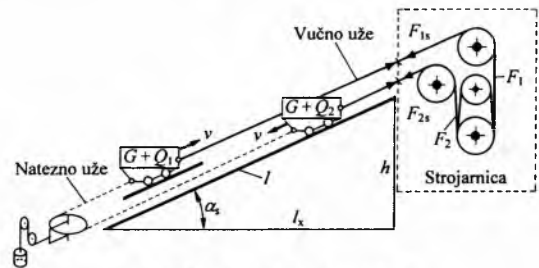
težina užeta po jedinici duljine:

$$q = k_s d^2, \quad (2)$$

a dopušteno opterećenje užeta:

$$F_d = \frac{F_l}{S} = \frac{k_1}{S} d^2 = k_d d^2, \quad (3)$$

gdje je d promjer užeta, k_1 faktor čvrstoće užeta, k_s faktor težine užeta, k_d faktor nosivosti užeta, a S faktor sigurnosti užeta.



Sl. 6. Proračunski model uspinjače

Kriterij izbora užeta jest

$$F_l = F_{\max} \leq F_d = k_d d^2, \quad (4)$$

gdje je F_l veća sila na pogonskoj užnici (sl. 6). Pripadna sila F_{1s} u užetu na vrhu trase nešto je manja:

$$F_{1s} = F_1 \eta_0, \quad (5)$$

gdje je η_0 faktor iskorištenja užetnika ($\eta_0 = 0,98$). Analogno vrijedi i za manju silu F_2 na pogonskoj užnici i za pripadnu silu F_{2s} . Razlika sila daje najveću vučnu silu F_0 na obodu užnice pri jednoličnoj vožnji i pri pokretanju, odnosno pri kočenju motorom:

$$F_0 = F_1 - F_2 = F_2 (e^{\mu \alpha_0} - 1), \quad (6)$$

gdje je μ koeficijent trenja ($\mu = 0,2$ ili $0,16 \dots 0,25$ za obloženu užnicu), a α_0 (u radijanima) pogonski obuhvatni kut. Tim iznosom koeficijenta trenja uzima se u obzir lagano podmazivanje, te utjecaj kiše, snijega i leda. Radi sigurnosti od proklizavanja treba vučnim faktorom $e^{\mu \alpha}$ osigurati dovoljnu rezervu vučne sile F_0 (α , u radijanima, raspoloživi je obuhvatni kut), pa obuhvatni kut pogonske užnice (u radijanima) treba biti

$$\alpha \geq \ln \left[S_v \left(\frac{F_1}{F_2} - 1 \right) + 1 \right], \quad (7)$$

gdje je S_v faktor sigurnosti vuče (u normalnom pogonu $S_v = 1,25 \dots 1,5$, za prisilno kočenje $S_v = 1$).

Promjer užeta treba odrediti za položaj uspinjače u kojem je sila F_{1s} najveća. Za uspinjaču sa stalnim kutom uspona α_s to je položaj s punim vagonom na donjoj postaji. Pri pokretanju uzbrdo u tom je položaju sila u užetu na vrhu trase

$$F_{1s} = (G + Q + ql) \left(\sin \alpha_s + w \cos \alpha_s + \frac{a_p}{g} \right), \quad (8)$$

gdje je G težina vagona, Q težina korisnog tereta, l duljina trase, w specifični otpor vožnje, a g ubrzanje sile teže. Pri kočenju u istoj poziciji nizbrdo sila je u užetu na vrhu trase

$$F_{1s} = (G + Q + ql) \left(\sin \alpha_s - w \cos \alpha_s + \frac{a_k}{g} \right). \quad (9)$$

Ako je

$$f_p = \sin \alpha_s + w \cos \alpha_s + \frac{a_p}{g}, \quad (10)$$

$$f_k = \sin \alpha_s - w \cos \alpha_s + \frac{a_k}{g}, \quad (11)$$

promjer užeta treba biti

$$d \geq \sqrt{\frac{G + Q}{\frac{k_d \eta_0}{f_p} - k_s l}} \quad (12)$$

i

$$d \geq \sqrt{\frac{G + Q}{\frac{k_d \eta_0}{f_k} - k_s l}}. \quad (13)$$

Najveća je vučna sila uspinjače sa stalnim nagibom za vrijeme jednoličnog gibanja ($v = \text{const.}$) s punim vagonom uzbrdo ($Q_1 = Q$) i praznim vagonom nizbrdo ($Q_2 = 0$):

$$F_v = F_{1s} - F_{2s} = Q \sin \alpha_s + qh + w[(2G + Q) \cos \alpha_s + ql_x], \quad (14)$$

a kočna sila pri gibanju punog vagona nizbrdo, a praznoga uzbrdo:

$$F_k = F_{1s} - F_{2s} = Q \sin \alpha_s + qh - w[(2G + Q) \cos \alpha_s + ql_x], \quad (15)$$

gdje je h visinska razlika, a l_x horizontalna projekcija trase.

Moment i snaga pogonskog motora tada su za vrijeme jednoličnog gibanja punog vagona uzbrdo:

$$M_v = \frac{F_v}{i_m \eta}, \quad P_v = \frac{F_v v}{\eta}, \quad (16)$$

za vrijeme pokretanja uzbrdo s ubrzanjem a_p :

$$M_p = M_v + \left(I_{\text{rot}} + \frac{m_{\text{tr}}}{i_m^2} \eta \right) a_p i_m, \quad P_p = M_p \omega, \quad (17)$$

a za vrijeme kočenja (s punim vagonom nizbrdo) s usporenjem a_k :

$$M_k = \frac{F_k}{i_m} \eta + \left(I_{\text{rot}} + \frac{m_{\text{tr}}}{i_m^2} \eta \right) a_k i_m, \quad P_k = M_k \omega, \quad (18)$$

gdje je $i_m (= \omega/v = i_{\text{red}}/R)$ prijenosni omjer pogonskog mehanizma, ω brzina vrtnje motora, v brzina vožnje, i_{red} prijenosni omjer reduktora, R polumjer pogonske užnice, I_{rot} moment inercije rotirajućih masa, a m_{tr} zbroj translacijskih masa (vagoni + teret + uže u punoj duljini).

LIT. C. Risch, F. Lademann, Der öffentliche Personennahverkehr. Springer-Verlag, Berlin 1957. - E. Czitary, Seilschwebbahnen. Springer-Verlag, Wien 1962. - W. Hefti, Schienenseilbahnen in aller Welt. Birkhäuser Verlag, Basel-Stuttgart 1975.

D. Ščap