PRESEK
List za mlade matematike, fizike, astronome in računalnikarje

ISSN 0351-6652
Letnik **21** (1993/1994)
Številka 5
Strani 276–283

Andrej Likar:

# FIZIKA NA KOLESU

Ključne besede: fizika.

Elektronska verzija: http://www.presek.si/21/1186-Likar.pdf

# FIZIKA NA KOLESU

Kako prijetno se je voziti s kolesom! Ob tem pa se kdaj pa kdaj spomnimo tudi na fiziko. Opisali bomo nekaj preprostih poskusov, ki nam bodo osvežili morda že pozabljena poglavja mehanike - najstarejše veje fizike.

## 1. Tlak

Škotski veterinar John Dunlop je leta 1888, torej pred več kot stotimi leti, iznašel pnevmatiko za kolo. Vožnja s kolesom je s tem postala prijetna, kolo so pričeli uporabljati tudi pri vsakdanjih prevozih.

Stisnjen zrak v pnevmatiki blaži udarce kolesa ob kamenje in ostre robove ceste. Trenje med kolesi in cesto je majhno, še posebno pri dirkalnih kolesih. Pnevmatike morajo biti čvrste, da jih na cesti ne preluknjamo, in dovolj mehke, da blažijo udarce. Pravimo, da mora imeti stisnjen zrak v njih ustrezen *tlak*. To je fizikalna količina, ki pove s kolikšno silo pritiska zrak na dano ploskev pnevmatike. Če označimo velikost te ploskve z $S$, silo, s katero pritiska stisnjen zrak na to ploskev pa z $F$, izračunamo tlak takole:

$$p = \frac{F}{S}.$$

Enota za tlak je $\mathrm{Nm}^{-2}$ in jo imenujemo pascal (Pa), večja enota pa je bar. Zrak s tlakom enega bara pritiska na ploskev z velikostjo $1\mathrm{m}^2$ s silo $10^5\mathrm{N}$ ali, drugače povedano, s silo 10N na ploskev z velikostjo $1\mathrm{cm}^2$. Težo 10N ima utež z maso enega kilograma.

Ko se povzpnemo na kolo, se stična ploskev med pnevmatiko in cesto poveča. Sila, s katero potiska cesta kolo navzgor, je po velikosti enaka skupni teži kolesa in kolesarja. Stisnjen zrak v pnevmatikah deluje znotraj stičnega dela pnevmatike s cesto z enako veliko, a nasprotno usmerjeno silo. Teža kolesa s kolesarjem je sorazmerna s skupno maso $m$ obeh:

$$F_t = mg,$$

kjer smo z $g$ označili pospešek prostega pada $g = 10\mathrm{ms}^{-2}$. Sila stisnjenega zraka na stično ploskev je:

$$F_z = pS,$$

pri čemer je $p$ tlak zraka v pnevmatiki, $S$ pa velikost stične ploskve. Iz enačbe

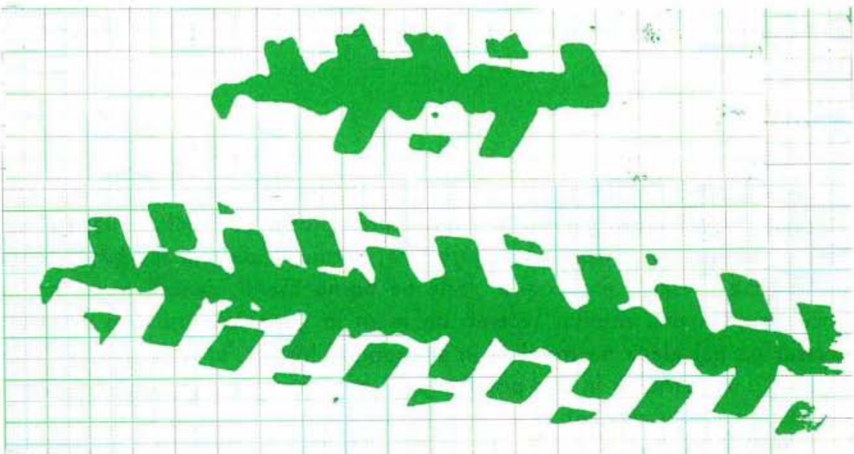
$F_t = F_z$ sledi torej

$$mg = pS$$

in

$$p = \frac{mg}{S}.$$

Če izmerimo velikost stične ploskve obeh koles in poznamo skupno maso, lahko izračunamo tlak v zračnicah. Preverimo lahko tudi, če je razmerje med težo in stično ploskvijo enako pri poljubni skupni masi $m$. Na sliki 1 sta odtisa obeh pnevmatik nekega kolesa na milimetrskem papirju. Pri jemanju tega odtisa se kolo ni premikalo v vodoravni smeri. Skupna masa je bila 72kg. Oceni iz teh podatkov tlak v pnevmatikah tega kolesa, če veš, da je bil tlak zraka v pnevmatiki sprednjega kolesa dvakrat večji kot tlak v zadnji.



Slika 1.

## 2. Merilnik hitrosti

Pri poskusih bomo potrebovali kolo z merilnikom hitrosti. Le-ta določa hitrost kolesa na osnovi časa, ki ga porabi sprednje kolo za en obrat. V tem času prepotuje kolesar razdaljo, ki je enaka obsegu kolesa. Če kolo porabi za en obrat $t_0$ sekund, je kolesarjeva hitrost $v$:

$$v = \frac{o}{t_0},$$

pri čemer smo obseg kolesa označili z $o$. Sodobni kolesarski merilniki hitrosti izračunajo trenutno hitrost kolesa iz te enačbe. Čas $t_0$ enega obrata izmerijo na podlagi sunkov iz merilne tuljavice na vilicah sprednjega kolesa. Ko se magnet, pritrjen na napero kolesa (špico), giblje mimo tuljavice, se v njej inducira napetostni sunek. Ta požene v merilniku vgrajeno uro, naslednji sunek pa uro ustavi. Obseg kolesa vpiše kolesar pred vožnjo v merilnik.

Oglejmo si primer. Pri obsegu kolesa $o = 197\text{cm}$ smo izmerili čas $t_0 = 0,3\text{s}$. Hitrost kolesa je potem:

$$v = \frac{o}{t_0} = \frac{1,97\text{m}}{0,3\text{s}} = 6,6\text{ms}^{-1}.$$

V takem merilniku je cel mikroračunalnik. Poleg trenutne hitrosti pokaže še povprečno hitrost pri izletu, prevoženo število kilometrov, največjo hitrost, ki smo jo dosegli na izletu, skupno število vseh prevoženih kilometrov, odkar smo merilnik pritrdili na kolo, in natančen čas trajanja izleta. Merilnik prijetno poživi kolesarjenje.

## 3. Pospeševanje

Sedaj smo pripravljeni na poskus s pospeševanjem kolesa. Kolo naj ima merilnik hitrosti. Poiščimo mirno cesto brez prometa. Podlaga naj bo čim bolj ravna in gladka. Kolo s kolesarjem naj miruje. Kolesarja začnemo krepko potiskati z vseskozi enako silo. Sile ne bomo merili, zanesli se bomo na občutek. Pri prvi meritvi tečemo ob njem in ga potiskamo eno sekundo, kolesar pa naj gleda na merilnik in si zapomni hitrost, ki jo je dosegel v tej sekundi. Ta izmerek in čas potiskanja si zapišimo. Nato ga od mirovanja potiskamo z isto silo kot prej, vendar dve sekundi dolgo in spet zapišemo končno hitrost. To ponovimo še za čase 3s, 4s,..., dokler še zmoremo teči skupaj s kolesarjem in ga obenem potiskati. Več kot 5 sekund verjetno ne bo šlo. Zapisane izmerke nato vrišemo. Hitrost po eni sekundi potiskanja smo na sliki 2 ponazorili z večjim krožcem. Njena oddaljenost od vodoravne osi grafa naj bo sorazmerna z doseženo hitrostjo. Nato narišemo hitrost po dveh sekundah potiskanja in nadaljujemo, dokler nam ne zmanjka izmerkov. Vidimo, da so krožci vse više. Če smo potiskali z enako silo pri vseh poskusih, se hitrost povečuje enakomerno. Pri dvakrat daljšem času potiskanja je končna hitrost kolesarja dvakrat večja. Tega morda iz risbe ne bomo prav jasno videli, a natančni poskusi potrjujejo takšen izid. Sedaj ponovimo poskus z lažjim kolesarjem. Tudi tega potiskajmo z enako silo kot prej težjega in spet narišimo sliko. Opazimo, da so končne hitrosti pri lažjem kolesarju večje kot pri težjem. Prav tako bi kolo bolj pospeševali, če bi kolesarja potiskali z večjo silo. Poskus nas prepriča, da je razmerje med končno hitrostjo in ustreznim časom pospeševanja odvisno od pospeševalne sile in skupne mase:

$$\frac{v}{t} = \frac{F}{m}.$$

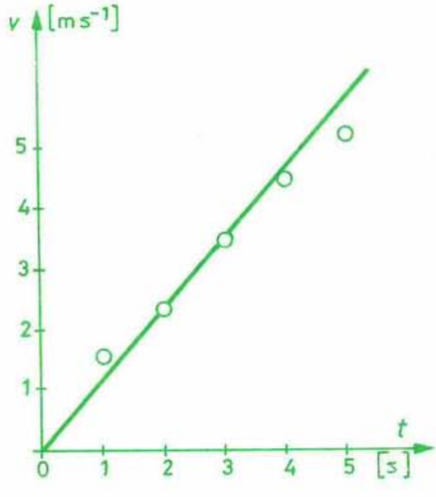
Razmerje med končno hitrostjo kolesarja in časom pospeševanja imenujemo pospešek in ga zaznamujemo s črko $a$. Ker ga znamo izračunati, saj smo hitrost in čas merili, lahko ob znani skupni masi izračunamo silo $F$. V našem primeru je ta masa 72kg, pospešek

$$a = \frac{5,8\text{ms}^{-1}}{5\text{s}} = 1,2\text{ms}^{-1}.$$

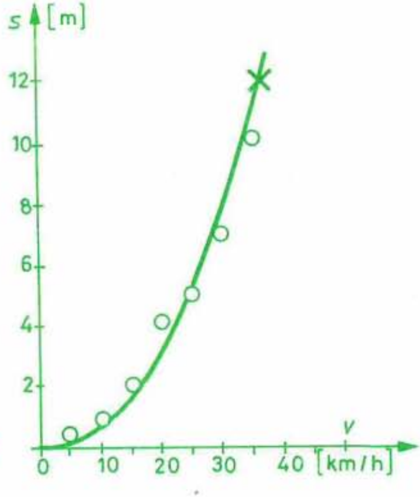
Sila je potem:

$$F = ma = 84\text{N}.$$

Tako težo ima telo z maso 8,4kg. Zvezo med silo $F$, maso $m$ telesa, ki ga pospešujemo, in njegovim pospeškom $a$ imenujemo drugi Newtonov zakon.




Slika 2.




Slika 3.

### 4. Zaviranje

Pri opazovanju zaviranja bomo na tla narisali črto. Zaleta vzamemo toliko, da dosežemo izbrano hitrost. Zavoro zadnjega kolesa stisnemo v trenutku, ko smo s prvim kolesom zapeljali na črto. Zavirano kolo naj se ves čas vrti in naj ne drsa po tleh. Razdaljo, ki jo prevozimo med zaviranjem, si zapišemo skupaj z začetno hitrostjo. Poskus ponovimo pri drugih začetnih hitrostih in narišemo na sliko prevoženo pot v odvisnosti od začetne hitrosti. Prevožene poti z začetno hitrostjo naraščajo. Pri dvakrat večji začetni hitrosti je sedaj pot kar štirikrat daljša (slika 3). Res tudi podrobnejše računanje pokaže, da prevožena pot $s$ narašča s kvadratom začetne hitrosti $v$, če zaviramo z enakim pojemkom $a$:

$$s = \frac{v^2}{2a}.$$

Pojemek $a$ je z Newtonovim zakonom povezan s silo zavor. Iz grafa našega poskusa razberemo, da je zavorna pot pri hitrosti $36\mathrm{km/h} = 10\mathrm{ms}^{-1}$ okrog 12 metrov. Pojemek $a$ je tedaj:

$$a = \frac{v^2}{2s} = \frac{100\mathrm{m}^2\mathrm{s}^{-2}}{24\mathrm{m}} = 4,2\mathrm{ms}^{-1}$$

in zaviralna sila $F = ma = 300\mathrm{N}$. Zavore so presenetljivo učinkovite, saj smo zavirali le zadnje kolo.

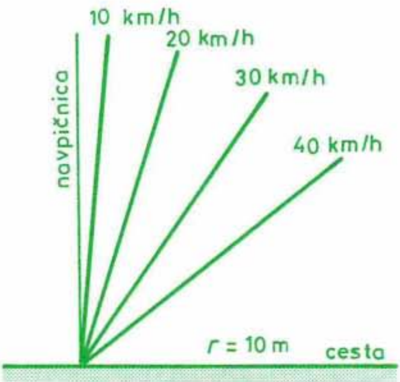
### 5. Vožnja v ovinek

Pri vožnji v ovinek se kolesar s kolesom giblje po ukrivljeni poti. Pri gibanju naravnost deluje cesta na kolo le v navpični smeri navzgor, da premaga težo. Silo trenja med cesto in pnevmatikami zanemarimo. Najlaže obravnavamo gibanje po krožnici s polmerom $r$. Pri takem gibanju mora kolo potiskati sila, ki kaže proti središču krožnice, torej pravokotno na trenutno smer potovanja. Pravimo ji radialna sila. Iz enačbe za to silo:

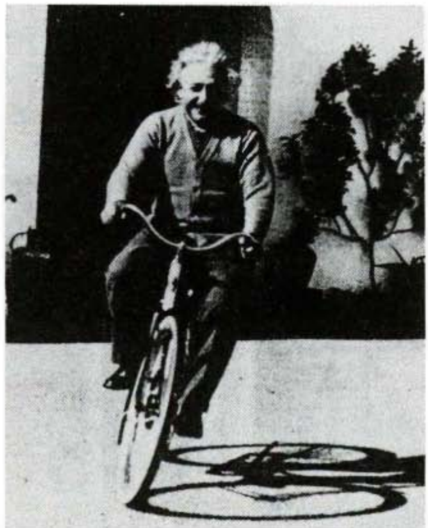
$$F_r = m\frac{v^2}{r},$$

pri čemer je spet $v$ hitrost kolesa, vidimo, da kolesar z maso 72kg, ki s hitrostjo 20km/h zapelje v krožni ovinek s polmerom 10m, potrebuje radialno silo 222N. Kolesar se v ovinku nagne. Cesta tedaj potiska kolo poševno, torej hkrati navpično in vodoravno. Opazimo, da je v enačbi za radialno silo hitrost kvadrirana. To pomeni, da potrebuje dvakrat hitrejši kolesar pri vožnji v isti ovinek kar štirikrat večjo radialno silo in se mora zato v ovinku precej bolj nagniti. Slika 4 kaže nagibe pri vožnji v ovinek z radijem 10m s hitrostmi 10, 20, 30 in 40km/h. Nagib pri hitrosti 40km/h je tako velik, da bi kolesar prav gotovo padel.

Oceni hitrost, s katero se pelje Einstein na sliki 5 v ovinek!




Slika 4.



Slika 5.

## 6. Moč pri kolesarjenju

Pri kolesarjenju moramo premagovati silo trenja in upor zraka. Za to potrebujemo moč mišic nog, ki poganjajo stopalke. Mehanično moč izračunamo iz enačbe:

$$P = Fv,$$

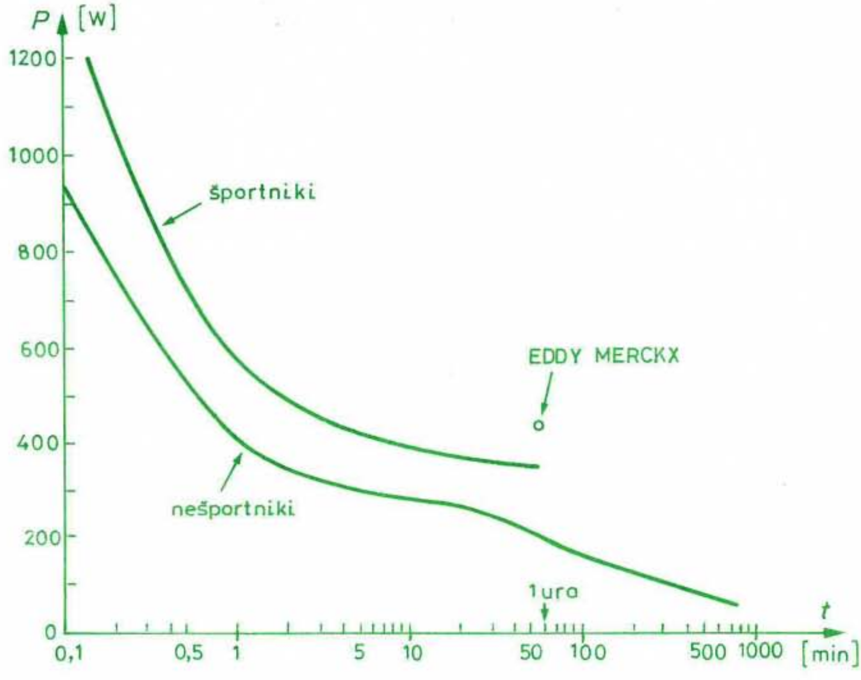
pri čemer je $F$ zaviralna sila trenja in zračnega upora, $v$ pa hitrost kolesa. Pri vožnji s hitrostmi, ki so večje od 10km/h, prevladuje zračni upor, zato lahko trenje pri teh hitrostih celo zanemarimo. Upor lahko izmerimo z zaviralnim poskusom, le da sedaj zavira zrak. Upor zraka je močno odvisen od hitrosti kolesarja glede na zrak. Zaviralni poskus bomo zato izvedli drugače kot prej.

Merili bomo čas, ko se bo kolesarjeva hitrost zmanjšala od hitrosti $v_1 = 30\text{km/h}$ na $v_2 = 25\text{km/h}$. V tem času se upor zraka le malo spreminja. V računih bomo privzeli, da sta sila in z njo pojemek med zaviranjem konstantna. Merimo v brezvetrju in na vodoravni podlagi. Meritev je dobro opraviti dvakrat: pri drugi naj vozi kolesar v nasprotni smeri kot pri prvi. Čas zaviranja mora biti pri obeh poskusih približno enak, če ne moti nagib ceste ali veter. Pri poskusu smo izmerili čas pojemanja $t = 4,6\text{s}$, pojemek je torej:

$$a = \frac{v_1 - v_2}{t} = 0,3\text{ms}^{-2},$$

upor pa sledi iz Newtonovega zakona:

$$F = ma = 72\text{kg} \cdot 0,3\text{ms}^{-2} = 22\text{N}.$$




Slika 6.

Tako silo moramo premagovati pri enakomerni vožnji s hitrostjo nekaj nad 25km/h. Moč, ki jo pri tem potrebujemo, je:

$$P = Fv = 22\text{N} \cdot 7,6\text{ms}^{-1} = 168\text{W}.$$

Poskus smo ponovili pri začetni hitrosti 20km/h in končni 15km/h. Tu je bil čas 6s in ustrezna moč le 80W.

Za človeka je 168W kar velika moč. Pomisliti moramo, da je konjska moč, ki so jo nekdaj uporabljali kot enoto, le 750W. Eddy Merckx je bil eden od najmočnejših kolesarjev vseh časov. Pri nekem poskusu je v laboratoriju eno uro poganjal kolo z močjo blizu 500W. S slike 6 razberemo mehanično moč, ki jo človek zmore pri nepretrganem in enakomernem naporu. Vidimo, da moč s trajanjem napora izrazito pada. Z močjo 168W bi odrasel človek lahko delal nepretrgoma le eno uro, z močjo 80W pa že osem ur. Na kolesarskih dirkah vozijo kolesarji po ravnem s hitrostmi nad 50km/h, vendar imajo posebna kolesa in obleko, precej časa pa vozijo v zavetrju drugih tekmovalcev. Na dirki, ki traja 2 do 3 ure, bi pobegli tekmovalec lahko poganjal kolo z močjo blizu 400W.

Verižni prenos moči do zadnjega kolesa in prestave omogočijo udobno kolesarjenje. Stopalki sta nameščeni na ustreznem mestu, prestave pa omogočijo, da stopalki vrtimo s primerno frekvenco. Prepočasno vrtenje bi pri dani moči terjalo pretrdo potiskanje, pri prehitrem vrtenju pa kolesa ne bi mogli izdatneje potiskati. V to se hitro prepričamo, če želimo peljati po ravnem v prenizki prestavi ali navkreber v previsoki.

*Andrej Likar*