

I. UVODNI POJMOVI

1. **Fizika** — temeljna prirodna znanost koja kvantitativnim metodama proučava opća svojstva tvari i pojava u tvarima. Obično se dijeli na teorijsku i eksperimentalnu.

Eksperimentalna fizika – bavi se promatranjem i otkrivanjem fizičkih pojava izvođenjem eksperimenata i mjerenjem fizičkih veličina, te traženjem veza između tih veličina.

Teorijska fizika – bavi se konstruiranjem fizikalnih teorija koje opisuju najveći opseg pojava na osnovi eksperimentalnih podataka, te deduktivnom metodom izvodi zaključke i predviđanja novih pojava i zakonitosti. Ukazuje na smjer daljnjih eksperimentalnih istraživanja.

2. **Fizička pojava** — iskustvena činjenica koja je predmet izučavanja fizike.

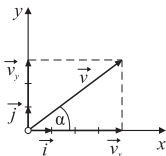
3. **Fizički zakon** — tvrdnja koja se odnosi na fizičke pojave, dovoljno eksperimentalno utemeljena i racionalno zasnovana. Fizički zakoni imaju kvantitativni oblik i mogu se napisati u funkcijskoj zavisnosti između fizičkih veličina u uzročno-posljedičnoj vezi.

Npr. u Ohmovom zakonu ($I = \frac{1}{R} \cdot U$) postoji funkcijska veza između promjenljive veličine (varijable) I – jakosti struje koja teče električnim vodičem (posljedica) i druge promjenljive veličine U – električnog napona na krajevima tog vodiča (uzrok). Faktor $\frac{1}{R}$ je ovdje koeficijent proporcionalnosti. Iz funkcijske zavisnosti dobivamo definicijski izraz (relaciju, formulu) nove fizičke veličine

– otpora električnog vodiča: $R = \frac{U}{I}$.

4. **Fizička teorija** — kompaktni sustav fizičkih zakona koji opisuju neku fizičku pojavu ili skup fizičkih pojava.
5. **Materija** — skupni naziv za sve objekte koji se mogu istraživati fizikalnim metodama. Materija postoji u mnogo različitih oblika, npr. čestice, energija, polja. Osnovno svojstvo materije je da ona uvijek ima energiju.
Pažnja! U teoriji elementarnih čestica pojam materije koristi se u užem smislu. Tamo se fotoni i druge čestice odgovorne za međudjelovanja (\rightarrow 687) nazivaju česticama materije, tzv. *posrednički bozoni* ne smatraju se česticama materije.
6. **Fizičko tijelo** — bilo koji pojedinačni materijalni objekt, npr. kapljica vode, automobil, planet, . . .
7. **Fizička veličina** — svojstvo tijela ili pojave koje se može izraziti kvalitativno i kvantitativno, te tako usporediti s istom veličinom kod drugih tijela ili pojava.
Izraz “veličina” upotrebljava se također i u općem značenju (npr. duljina, vrijeme, masa, . . .) kao i u određenom značenju (npr. duljina puta, vrijeme prelaska puta, . . .).
8. **Iznos fizičke veličine** — umnožak *brojčane vrijednosti* fizičke veličine i *jedinice mjere*, pri čemu je *brojčana vrijednosti fizičke veličine* A (u oznaci $\{A\}$) broj koji određuje koliko mjernih jedinica sadrži A .
Jedinica mjere fizičke veličine A označava se s $[A]$. Npr. zapis $s = 6\text{ m}$ znači da je $\{s\} = 6$, a $[s] = \text{m}$.
9. **Jedinica mjere** — točno određen (međunarodnim dogovorom) iznos neke fizičke veličine za čiji je brojčani iznos dogovorno uzeto da je jednak jedan, npr. 1 metar u 1 sekundi. Promatrana istovrsna fizička veličina uspoređuje se s jedan. Oznake jedinica međunarodno su dogovorene i ispisuju se uspravnim tiskanim slovima. Jedinice koje su dobile naziv po znanstvenicima, ako se zapisuju u cjelosti, pišu se s malim početnim slovom i fonetski, npr. njutn, džul, herc, kulon, . . .

10. **Simbol (oznaka) jedinice mjere** — međunarodno dogovoreni znak (jedno ili više slova) za mjernu jedinicu, npr. m – metar, N – njutn, T – tesla . . . Simboli jedinica koje nose nazive po znanstvenicima pišu se velikim uspravnim slovima (obično prvo slovo prezimena) sačuvavši originalni način pisanja, npr. C – Coulomb (kulon), J – Joule (džul), iznimno Ω – Ohm (om) (iznimno se koristi grčko slovo Ω , da ne bi došlo do zabune s oznakom 0 tj. nulom).
11. **Skalar** — fizička veličina koja je određena samo jednim podatkom – iznosom, npr. masa, put, energija, temperatura...
12. **Vektor** — fizička veličina određena iznosom, pravcem i smjerom na pravcu, te točkom djelovanja (npr. hvatište sile), što nije uvijek potrebno. Primjeri: brzina, ubrzanje, sila, jakost električnog, magnetskog i gravitacijskog polja, . . . Vektorske veličine se grafički prikazuju strelicama koje određuju pravac i smjer vektora, a u određenom mjerilu svojom duljinom i iznos prikazane veličine. Tako je na slici iznos $|\vec{v}| = 5$.



Vektorska veličina može se razložiti na *komponente* – najčešće projekcije vektora na koordinatne osi (tako su iznosi komponenti vektora \vec{v} sa slike $v_x = v \cos \alpha = 4$ i $v_y = v \sin \alpha = 3$). Često se pod “komponente” podrazumijevaju upravo iznosi komponenta. Vektori u smjeru osi x i y su onda $\vec{v}_x = v_x \vec{i}$ i $\vec{v}_y = v_y \vec{j}$, gdje su \vec{i} i \vec{j} jedinični vektori na osima. Ti se iznosi nazivaju još i “koordinate vektora”. Početak vektora je tada u ishodištu koordinatnog sustava na slici. Za računanje s vektorima pogledajte pogl. XXIX.

13. **Osnovne veličine** — veličine koje se u danom sustavu uzimaju nezavisnim i pomoću kojih se izražavaju ostale, izvedne veličine (\rightarrow 283). *Izvedena* veličina može se izraziti pomoću osnovnih koristeći definicijske formule za te, izvedene veličine. Npr. brzinu izrazimo pomoću osnovnih veličina puta i vremena koristeći formulu $v = \frac{s}{t}$.

14. **Dimenzija fizičke veličine (jedinice)** — izraz koji daje zavisnost izvedene veličine (ili jedinice) od osnovnih veličina (jedinica). Taj izraz ima oblik produkta osnovnih veličina s određenim eksponentima pojedinih faktora (cijelih ili razlomljenih, pozitivnih ili negativnih). Dimenzija dane veličine označava se simbolom te veličine u uglatoj zagradi. Npr. za ubrzanje imamo:

$$[a] = \left[\frac{\Delta v}{\Delta t} \right] = \frac{[\Delta v]}{[\Delta t]} = \frac{\left[\frac{\Delta x}{\Delta t} \right]}{\Delta t} = \frac{[\Delta x]/[\Delta t]}{\Delta t} = \frac{[x]/[t]}{[t]} = \frac{[x]}{[t]^2},$$

$$[a] = [x][t]^{-2} \implies \text{jedinica: } [a] = \text{m} \cdot \text{s}^{-2} = \frac{\text{m}}{\text{s}^2}.$$

Za rad imamo:

$$[W] = [F][s] = [m][a][s] \implies [W] = \text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{m} = \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^2}.$$

15. **Bezdimenzijska veličina** — veličina kod koje je kombinacija eksponenata osnovnih veličina, pomoću kojih se izražava, jednaka nuli (“čist broj”). Npr. koeficijent trenja – omjer dviju sila istovrsnih veličina (sila).

16. **Dimenzijska analiza** — metoda koja omogućava provjeru ispravnosti formula, jednadžbi, utvrđivanjem dimenzije i jedinice izvedenih veličina. Mogu se izvesti izrazi za mnoge fizičke veličine ako znamo o kojim veličinama ta veličina zavisi. Metoda se zasniva na “principu homogenosti dimenzije” koja omogućava da se svaka fizička veličina napiše u obliku produkta faktora

s određenim eksponentima. To se zasniva na činjenici da se svaka fizička jedinica (veličina) može napisati u obliku produkta osnovnih fizičkih jedinica (veličina). Npr.

$$\Omega = \text{m}^2 \text{kg s}^{-3} \text{A}^{-2}, \quad \text{odnosno} \quad [R] = L^2 \cdot M \cdot T^{-3} \cdot I^{-2}.$$

Primjer: Izvedimo formulu za vrijeme slobodnog pada tijela mase M s visine h . Pretpostavimo da t_S ovisi o M , h i g (ubrzanje sile teže). Tada prema principu homogenosti dimenzije možemo napisati:

$$t_S = C \cdot M^x \cdot h^y \cdot g^z,$$

gdje C bezdimenzijska konstanta. Otuda dimenzijska jednakost za jedinice ima oblik:

$$\text{kg}^x \text{m}^y (\text{m s}^{-2})^z = \text{s},$$

iz čega, uspoređujući eksponente lijeve i desne strane slijedi:

$$x = 0, \quad y + z = 0, \quad -2z = 1 \implies z = -\frac{1}{2}, \quad y = \frac{1}{2},$$

pa imamo:

$$t = C \cdot h^{\frac{1}{2}} \cdot g^{-\frac{1}{2}} = C \cdot \sqrt{\frac{h}{g}}.$$

Konstanta C mora se odrediti na neki drugi način (npr. pokušima; $C \approx 1.41 \approx \sqrt{2}$). Tom metodom dobili smo i dodatnu informaciju – vrijeme padanja ne ovisi o masi.

17. **Međunarodni sustav jedinica mjere** — međunarodni sistematizirani skup jedinica mjere svih fizikalnih veličina, zasnovan na sedam osnovnih veličina i jedinica (v. tablicu na kraju knjige, str. 276.).
18. **Mjerenje** — postupak utvrđivanja iznosa neke fizičke veličine (\rightarrow 7, 8) odnosno usporedba te veličine s jedinicom.

19. **Neposredno mjerenje** — mjerenje kod kojega se iznos mjerenne veličine jednostavno očitava na (pomoću) mjerenom uređaju (npr. vaga, termometar, ampermetar, . . .).
20. **Posredno mjerenje** — mjerenje kod kojega se iznos tražene veličine određuje iz rezultata neposrednih mjerenja drugih fizičkih veličina koje su s traženom veličinom u poznatoj zavisnosti. Npr. otpor vodiča može se izmjeriti mjerenjem napona na krajevima vodiča i jakosti struje kroz vodič, gustoća tvari može se odrediti mjerenjem volumena i mase tvari.
21. **Nesigurnost mjerenja** — razlika između rezultata mjerenja neke fizičke veličine i njene stvarne vrijednosti. Nesigurnost se ne može u potpunosti izbjeći. Umjesto termina *nesigurnost mjerenja* upotrebljava se termin *pogreška mjerenja*. Riječ *pogreška* ovdje ne znači zabuna, nespretnost i sl. , već znači nemogućnost izbjegavanja greške povezane sa suštinom mjerenja. U zavisnosti od načina kako su nastale, pogreške se dijele na *sistematske, slučajne* i *grube*.
22. **Grube pogreške** — pogreške koje nastaju zbog neispravnosti uređaja, krivim očitanjem ili zapisivanjem rezultata, naglom promjenom okolnosti mjerenja. Rezultati takvih mjerenja (što se vidi po velikim razlikama između uzastopnih mjerenja) ne uzimaju se u obzir.
23. **Sistematske pogreške** — pogreške koje pri više mjerenja iste veličine ostaju stalne pokazujući neku pravilnost. Takve pogreške mogu nastati zbog:
- a) konstrukcijske nesavršenosti instrumenata ili netočne interpretacije pokazivanja instrumenata (tzv. *instrumentalne pogreške*).
 - b) nedostataka mjerne metode, nepreciznosti nedostataka opisa mjerene fizičke pojave, suviše pojednostavljene formule

kojom se izračunava mjerena veličina (tzv. *metodičke pogreške*).

24. **Slučajne pogreške** — pogreške koje su uzrokovane neregularnim čimbenicima, vanjskim i unutrašnjim. Ti čimbenici ne daju se uzeti u obzir jer djeluju na mjerenje na slučajan način, jednom povećavajući, a drugi put smanjujući mjerenu vrijednost, pa mjereći pri seriji mjerenja dobivamo svaki puta drukčiji rezultat. Ove pogreške pokazuju određenu statističku pravilnost koja se može relativno dobro opisati.

Slučajne pogreške mogu se umanjiti povećanjem broja mjerenja i statističkom obradom rezultata mjerenja.

25. **Srednja vrijednost mjerenja** $\langle x \rangle$ — računa se iz niza vrijednosti mjerenja x_i prema relaciji:

$$\langle x \rangle = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}.$$

26. **Apsolutna pogreška** Δx — apsolutna vrijednost najvećeg odstupanja iz niza mjerenja i srednje vrijednosti mjerenja:

$$\Delta x = |x_i - \langle x \rangle|_{\max}$$

Rezultat mjerenja zapisujemo tada u obliku:

$$x = \langle x \rangle \pm \Delta x.$$

27. **Relativna pogreška** — omjer apsolutne pogreške i srednje vrijednosti:

$$x_r = \frac{\Delta x}{\langle x \rangle}.$$

Izražava se često u postocima; tada je:

$$x_r = \frac{\Delta x}{\langle x \rangle} \cdot 100\%.$$

Relativna pogreška produkta ili kvocijenta dviju ili više veličina jednaka je zbroju relativnih pogrešaka tih veličina.

28. **Značajne znamenke** — znamenke koje se u području iznosa apsolutne pogreške ne mijenjaju za više od 1, a njihov je broj orijentacijska mjera relativne pogreške. Ako se neka veličina navodi bez navedene pogreške, podrazumijeva se da su sve znamenke značajne. Npr. napišemo li da je neko vrijeme 25 s, 25.0 s, 25.00 s to znači da je pogreška manja od 0.5 s, 0.05 s, 0.005 s.

29. **Pravilo o zapisu rezultata mjerenja**

- a) Pogreške treba zaokružiti na jednu značajnu znamenku.
- b) Posljednja značajna znamenka treba stajati na istom dekadskom mjestu kao i pogreška.

1. dio

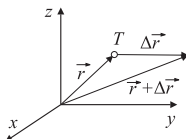
II. KINEMATIKA

1

30. **Referentni sustav** — tijelo ($\rightarrow \zeta$) ili sustav tijela u odnosu na koji se opisuje položaj promatranog tijela. S referentnim sustavom u pravilu se povezuje i koordinatni sustav.
31. **Gibanje** — promjena položaja tijela ($\rightarrow \zeta$) u odnosu na druga tijela (*referentni sustav*).
32. **Relativnost gibanja** — narav i opis gibanja zavise o izboru *referentnog sustava* u odnosu na koji se gibanje razmatra.
33. **Mehanika** — dio fizike koji proučava gibanja i veze između sila i gibanja.
34. **Kinematika** — dio *mehanike* koji se bavi opisom gibanja tijela ne uzimajući u obzir njihovu unutrašnju strukturu ni uzroke koji izazivaju promjene gibanja.
35. **Materijalna točka** — objekt koji ima masu ali nema dimenzije; to je model fizičkog objekta čije dimenzije zanemarujemo. Tijelo se tretira kao materijalna točka kada su udaljenosti koje prelazi to tijelo (ili udaljenosti na kojima to tijelo djeluje) mnogo veće od njegovih dimenzija, a unutrašnja struktura nema značenja za opis ponašanja tog tijela.
36. **Putanja** — linija (pravac ili krivulja) određena odabranim točkama tijela u gibanju u danom referentnom sustavu.
37. **Pravocrtno gibanje** — gibanje kod kojeg je putanja dio pravca.
38. **Krivocrtno gibanje** — gibanje tijela čija je putanja krivulja.
39. **Translatorno gibanje** — gibanje tijela kod kojega su putanje svih točaka jednake kako po obliku, tako i po dimenzijama (samo su jedne pomaknute u odnosu na druge).

Napomena. Ova se definicija ne odnosi na materijalnu točku čije se svako gibanje tretira kao translatorno.

40. **Rotacija** — gibanje kod kojega pojedine točke tijela opisuju kružnice sa središtima na jednom pravcu, koji se naziva *os rotacije*.
41. **Vektor položaja** — (radijus vektor) \vec{r} , vektor čiji se početak nalazi u ishodištu koordinatnog sustava a kraj u točki u kojoj se nalazi tijelo u danom trenutku.



42. **Pomak** — $\Delta\vec{r}$, vektor promjene položaja nastaje u vremenu $\Delta t = t_2 - t_1$ koji povezuje položaje tijela u trenutcima t_1 i t_2 .
43. **Put** s , Δs — skalarna veličina jednaka duljini dijela putanje koje je tijelo prešlo u zadanom vremenskom intervalu.
44. **Srednja brzina** v_{SR} — skalarna fizička veličina jednaka omjeru puta koje je tijelo prešlo u određenom vremenskom intervalu i tog vremenskog intervala.

$$v_{SR} = \frac{s}{t}, \quad v_{SR} = \frac{\Delta s}{\Delta t}.$$

45. **Trenutna brzina** v — stvarna brzina u danom trenutku jednaka omjeru puta Δs koje tijelo prijeđe u vrlo malom (“beskonačno malom”) vremenskom intervalu i tog intervala Δt , točnije $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$ kad $\Delta t \rightarrow 0$, što kraće pišemo

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt}.$$

Tu brzinu pokazuju brzinomjeri u vozilima!

46. **Srednji vektor brzine** — vektorska fizička veličina jednaka omjeru vektora pomaka $\Delta\vec{r}$ i vremenskog intervala u kojem je došlo do tog pomaka:

$$\vec{v}_{sr} = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}.$$

47. **Trenutni vektor brzine** \vec{v} — omjer vektora pomaka Δr nastalog u vrlo malom (“beskonačno malom”) intervalu vremena i tog intervala:

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt}.$$

Napomena. Pod pojmom brzina, ako nije drukčije rečeno, podrazumijeva se obično trenutna brzina.

48. Svojstva vektora brzine

- vektor trenutne brzine u svakom je trenutku tangencijalan na putanju;
 - iznos vektora trenutne brzine jednak je trenutnoj brzini tijela;
 - iznos vektora srednje brzine jednak je srednjoj brzini samo za pravocrtno gibanje kod kojeg se ne mijenja smjer vektora trenutne brzine;
 - srednji vektor brzine jednak je nuli ako je pomak jednak nuli, ali put i srednja brzina u tom vremenskom intervalu nisu jednaki nuli;
 - srednja vrijednost vektora brzine (srednja brzina) nije jednaka aritmetičkoj sredini trenutnih vrijednosti vektora brzine u početnoj i krajnjoj točki putanje osim za jednoliko i jednoliko promjenljivo gibanje i za neke posebne slučajeve.
49. **Jedinica brzine** je metar u sekundi $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ — to je brzina kod koje tijelo prijeđe jedan metar u jednoj sekundi.

Praktično se primjenjuje i jedinica *kilometar na sat* – $1 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ pri čemu je

$$1 \frac{\text{km}}{\text{h}} = \frac{1\,000\text{ m}}{3\,600\text{ s}} = \frac{1\text{ m}}{3.6\text{ s}}; \quad 1 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 3.6 \frac{\text{km}}{\text{h}},$$

tako je npr.

$$90 \frac{\text{km}}{\text{h}} = \frac{90}{3.6} = 25 \frac{\text{m}}{\text{s}}; \quad 20 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 20 \cdot 3.6 = 72 \frac{\text{km}}{\text{h}}.$$

50. **Jednoliko gibanje** — gibanje kod kojeg je brzina stalna, odnosno u po volji odabranim jednakim vremenskim intervalima putevi tijela su jednaki. Kod tog gibanja srednja brzina je jednaka trenutnoj.

51. **Jednoliko gibanje po pravcu** — gibanje kod kojeg je vektor \vec{v} brzine konstanta ($\vec{v} = \text{const}$), a putanja pravac. Kod tog gibanja je srednji vektor brzine jednak trenutnom.

Napomena. Činjenica da se naka fizička veličina ne mijenja zapisuje se u obliku $A = \text{const}$. (lat. constans = stalan).

52. **Svojstva jednolikog gibanja po pravcu**

Pretpostavke:

- i) os x koordinatnog sustava je pravac po kojem se tijelo giba;
- ii) početak mjerenja vremena $t_0 = 0$ i $\Delta t = t - t_0 = t$;
- iii) u početnom trenutku položaj tijela je $x(0) = x_0$, a u trenutku t je $x(t) = x$.

Svojstva:

- a) pomak Δx (prijedeni put s) je razmjeran (proporcionalan) vremenu trajanja gibanja a faktor proporcionalnosti je brzina v (iznos brzine uzduž osi x).

$$\Delta x = x - x_0 = v \cdot t, \quad (s = |x - x_0| = |v|t);$$

b) položaj tijela u zavisnosti o vremenu je linearna funkcija:

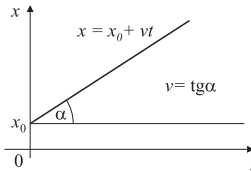
$$x = x_0 + vt$$

čiji je grafički prikaz pravac (v. sl. 1.); nagib pravca prema osi t povezan je s brzinom

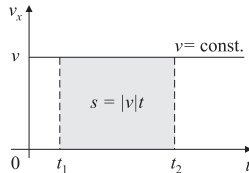
$$v = \operatorname{tg} \alpha;$$

c) ovisnost brzine o vremenu je konstanta (tj. brzina se ne mijenja). U grafičkom prikazu (v, t) to je pravac paralelan s osi t (v. sl. 2.); površina između tih linija i paralela t_1 i t_2 jednaka je iznosu pomaka tijela u vremenskom intervalu $\Delta t = t_2 - t_1$.

1.

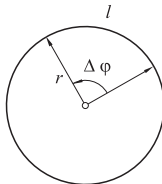


2.



Napomena. Kad se tijelo giba u negativnom smjeru osi x , uzimamo $v < 0$, $\Delta x < 0$, kut nagiba je $\alpha > 90^\circ$.

53. **Jednoliko kružno gibanje** — gibanje pri kojem tijelo (ili materijalna točka) prelazi u jednakim vremenima jednaki put gibajući se po kružnici ili dijelu kružnice bez vidljive veze sa središtem (planeti, sateliti. . .) ili kao dio tijela pri rotaciji (\rightarrow 54).



Brzina je tada:

$$v = 2\pi r f \quad \text{ili} \quad v = \frac{2\pi r}{T}$$

gdje je f – broj ophoda (ili frekvencija) tijela u sekundi, T – period trajanja jednog ophoda tako da je $T = \frac{1}{f}$. U tehničkoj praksi se broj ophoda računa po minuti. Jedinica je, dakle, $[n] = \text{okr/min}$; tako je

$$n = 60f.$$

54. **Kutna brzina** — kut prijeđen u jedinici vremena. Kružno gibanje tijela oko osi naziva se rotacija, koja kao i translacijsko gibanje može biti jednolika i nejednolika. Kutovi pri rotaciji mjere se radijanima. Ako je točka prešla put s gibajući se po luku kružnice polumjera r , onda je:

$$\varphi = \frac{s}{r}.$$

Broj stupnjeva β i broj radijana φ kuta povezani su formulom:

$$\beta : 360^\circ = \varphi : 2\pi.$$

Otuda izlazi da je $1 \text{ rad} = \frac{180^\circ}{\pi} \approx 57.3^\circ$. Kutna brzina ω mjeri se u rad/s i određena je izrazom

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{\Delta t}.$$

Obično ćemo uzimati $\varphi_1 = 0$, $\varphi_2 = \varphi$, $\Delta t = t$, pa će biti:

$$\omega = \frac{\varphi}{t}.$$

Kutna brzina i broj okretaja po sekundi f ili po minuti n povezani su u formuli:

$$\omega = 2\pi f = \frac{n\pi}{30},$$

a brzina v i kutna brzina:

$$v = r\omega.$$

55. **Jednolika ubrzana (usporena) rotacija (kružno gibanje)** — gibanje kod kojega se kutna brzina povećava ili smanjuje za jednaki iznos u jednakom vremenu. Kutno ubrzanje definiramo kao brzinu promjene kutne brzine:

$$\alpha = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\Delta t}.$$

Jedinica kutnog ubrzanja je: $[\alpha] = \text{rad/s}^2$.

Ako je početna kutna brzina $\omega_1 = 0$, $\Delta t = t$ dobivamo:

$$\omega = \alpha t.$$

Za prijedeni kut dobivaju se formule analogne onima kod jednolikog i jednoliko ubrzanog (usporenog) gibanja. Treba samo zamijeniti oznake i jedinice (v. pogl. 1): put $s \rightarrow$ kut φ , brzina $v \rightarrow$ kutna brzina ω , ubrzanje $a \rightarrow$ kutno ubrzanje α :

$$\varphi = \frac{(\omega_1 + \omega_2)t}{2}$$

ili, ako je $\omega_1 = 0$, $\omega_2 = \omega$

$$\varphi = \frac{\omega t}{2} = \frac{\alpha t^2}{2} = \frac{\omega^2}{2\alpha}.$$

Prijedeni kut φ i ukupni broj okretaja N povezani su formulom:

$$\varphi = 2\pi N.$$

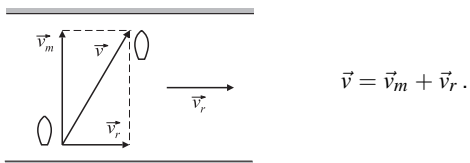
56. **Sastavljanje i rastavljanje gibanja** — metode razmatranja složenijih gibanja. Gibanje tijela u odnosu na neki referentni sustav razmatramo kao rezultat gibanja komponenata u odnosu na neke druge općenito različite referentne sustave. Vrijedi:

a) brzina tijela je vektorski zbroj pojedinih komponenata (sastavnica);

b) pomak tijela je vektorski zbroj pojedinih komponentata.

Ove tvrdnje izražavaju *načelo o nezavisnosti gibanja*.

Npr. ako se motorni čamac giba v_m u odnosu na vodu, a voda teče brzinom v_r , tada je brzina čamca za promatrača na obali



Iznos te brzine je

$$v = \sqrt{v_m^2 + v_r^2}.$$

Ako vektori \vec{v}_m i \vec{v}_r čine kut α , iznos brzine bit će

$$v = \sqrt{v_m^2 + v_r^2 + 2v_mv_r \cos \alpha}.$$

Još neki primjeri složenog gibanja: hici (\rightarrow str. 27, 28), pisanje, crtanje, gibanje unutar vozila, točke na kotaču kod vozila u gibanju, ...

57. **Relativnost brzine** — brzina tijela zavisi o prihvaćenom referentnom sustavu. Ako se tijelo giba brzinom \vec{v}' u odnosu na sustav K' i brzinom \vec{v} u odnosu na sustav K , onda je

$$\vec{v} = \vec{u} + \vec{v}',$$

gdje je \vec{u} brzina sustava K' u odnosu na sustav K . Ova tvrdnja naziva se *Galilejevom transformacijom brzine*.

58. **Ubrzanje** \vec{a} — vektorska fizička veličina koja daje promjenu brzine materijalne točke. Pravac i smjer vektora ubrzanja \vec{a} podudara se s pravcem i smjerom promjene vektora brzine, a može se mijenjati samo iznos brzine (kod gibanja po pravcu) ili samo

smjer (kod jednolikog gibanja po krivulji) ili obje veličine (kod nejednolikog gibanja po krivulji).

59. **Srednje ubrzanje** — \vec{a}_{sr} , omjer promjene vektora brzine i vremenskog intervala u kojem je došlo do te promjene:

$$\vec{a}_{sr} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}.$$

60. **Smjer vektora ubrzanja** — smjer vektora ubrzanja općenito je različit od smjera brzine, tako npr. kod usporenog gibanja po pravcu ti su smjerovi protivni (\rightarrow 65.), a kod gibanja po kružnici je $\vec{a} \perp \vec{v}$. Smjer vektora ubrzanja jednak je smjeru vektora brzine samo kod ubrzanog gibanja po pravcu.
61. **Trenutno ubrzanje**, \vec{a} — omjer promjene vektora brzine i vrlo kratkog (beskonačno kratkog, koji teži prema nuli) vremenskog intervala u kojem je ta promjena nastala

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt}.$$

Napomena. Obično se u izrazu “trenutno ubrzanje” ispušta riječ “trenutno” pa se pod “ubrzanje” podrazumijeva dakle trenutno ubrzanje.

Jedinica ubrzanja je **metar u sekundi na kvadrat** $\left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)$ – kaže

se da tijelo ima ubrzanje $1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ ako se iznos brzine promijeni za $1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ svake sekunde.

62. **Ubrzano (usporeno) pravocrtno gibanje** — pravocrtno gibanje kod kojega se iznos brzine mijenja tj. $v \neq \text{const.}$, ili $a \neq 0$ i ima smjer jednak smjeru vektora brzine što simbolično zapisujemo $\vec{v} \uparrow \uparrow \vec{a}$ ili $\vec{v} \uparrow \uparrow \Delta \vec{v}$ odnosno $\vec{v} \uparrow \downarrow \vec{a}$ ili $\vec{v} \uparrow \downarrow \Delta \vec{v}$.
 Kod ubrzanog pravocrtnog gibanja iznos brzine se povećava a kod usporenog se smanjuje, predznaci brzine i ubrzanja su kod ubrzanog gibanja jednaki, a kod usporenog suprotni.

63. **Usporenje** — vektorska veličina koja daje promjenu brzine kad se iznos vektora brzine smanjuje. Kod gibanja po pravcu smjer je tog vektora suprotan smjeru brzine.

64. **Nejednoliko gibanje** — pravocrtno gibanje kod kojeg se brzina ne mijenja jednoliko (linearno).

65. **Pravocrtno jednoliko ubrzano (usporeno) gibanje** — pravocrtno gibanje kod kojega je trenutno ubrzanje konstantno $a = \text{const.}$, a smjerovi vektora brzine i ubrzanja su jednaki (suprotni). U takvim slučajevima je srednje ubrzanje jednako trenutnom.

Primjer. Slobodni pad i gibanje niz kosinu (ako se može zanemariti otpor zraka).

66. **Svojstva jednoliko ubrzanog gibanja**

Pretpostavke:

a) os x koordinatnog sustava je uzduž pravca po kojem se odvija gibanje; po toj osi mjeri se put;

b) početak mjerenja vremena t_0 pa je $\Delta t = t - t_0 = t$;

c) uz te pretpostavke je iznos ubrzanja:

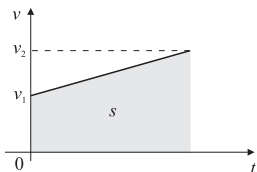
$$a = \frac{v_2 - v_1}{t},$$

put:

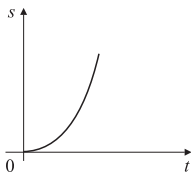
$$s = v_1 t + \frac{at^2}{2} \quad \text{ili} \quad s = \frac{(v_2 + v_1)t}{2} \quad \text{ili} \quad s = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2a}.$$

Ovdje je s put, a t vrijeme u kojem se brzina poveća od v_1 na v_2 . Grafički prikazi brzine i puta dani su na sl. 1. i 2.

1.

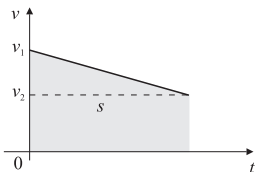


2.

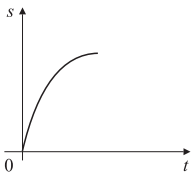


67. Kod jednolikog usporenog gibanja je $v_2 < v_1$, pa u formulama iz prethodne tvrdnje treba staviti $a < 0$. Grafički prikaz brzine i puta vidi se na sl. 1. i 2.

1.



2.



68. U jednostavnijem slučaju, kad je početna ili konačna brzina jednaka nuli, tj. ako tijelo kreće iz mirovanja $v_1 = 0$, $v_2 = v$ ili ako se zaustavlja $v_2 = 0$, $v_1 = v$ imamo:

$$a = \frac{v}{t},$$

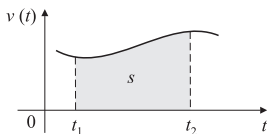
$$s = \frac{vt}{2} \quad \text{ili} \quad s = \frac{at^2}{2} \quad \text{ili} \quad s = \frac{v^2}{2a}.$$

69. U općem slučaju, ako se ubrzanje (kao posljedica djelovanja sile) i brzina mijenjaju na proizvoljan, ali poznat način, brzina i put

se mogu odrediti kao integrali

$$v(t) = \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt, \quad s = \int_{t_1}^{t_2} v(t) dt,$$

a grafički kao površina ispod krivulje $a(t)$, odnosno $v(t)$ (vidi sliku).



70. Iz krivulja $v(t)$ i $s(t)$ mogu se odrediti srednje ubrzanje kao omjer $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$ i srednja brzina kao omjer $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$ (v. sl. 1.), a trenutno kao koeficijent smjera tangente ($\operatorname{tg} \alpha$) u zadanoj točki (vremenu) (v. sl. 2.).

