PRO STŘEDNÍ ŠKOLY

Nová

FYZIKA

V KOSTCE

Helena Sixtová

FRAGMENT

Nová fyzika v kostce pro SŠ

Vyšlo také v tištěné verzi

Objednat můžete na
www.fragment.cz
www.albatrosmedia.cz

FRAGMENT

Helena Sixtová
Nová fyzika v kostce pro SŠ – e-kniha

ALBATROS MEDIA

Nová FYZIKA V KOSTCE

pro SŠ

Helena Sixtová

FRAGMENT

OBSAH

1. Fyzikální veličiny, jednotky, měření . . . 7
Rozdělení fyzikálních veličin a jednotek . . . 7
Skalární a vektorové fyzikální veličiny . . . 10
Měření fyzikálních veličin . . . 11

2. Mechanika – kinematika . . . 12
Základní pojmy . . . 12
Rozdělení pohybů . . . 15

3. Mechanika – dynamika . . . 21
Síla, silové účinky . . . 21
První Newtonův pohybový zákon = zákon setrvačnosti . . . 21
Druhý Newtonův pohybový zákon = zákon síly . . . 22
Třetí Newtonův pohybový zákon = zákon akce a reakce . . . 24
Tíha a tíhová síla, těžiště . . . 25
Třecí síla . . . 25
Valivý odpor . . . 27
Dostředivá síla . . . 27
Setrvačné síly . . . 28
Rozklad síly . . . 29

4. Mechanická práce, energie, výkon . . . 30
Mechanická práce . . . 30
Kinetická a potenciální energie . . . 31
Zákon zachování mechanické energie (ZZME) . . . 31
Výkon, účinnost . . . 33

5. Gravitační pole . . . 36
Newtonův gravitační zákon . . . 36
Pohyby těles v homogenním tíhovém poli Země – vrhy . . . 38
Pohyby těles v centrálním gravitačním poli Země . . . 41
Pohyby těles v gravitačním poli Slunce . . . 42

6. Mechanika tuhého tělesa . . . 45
Moment síly . . . 45
Momentová věta . . . 46
Skládání a rozkládání sil působících na tuhé těleso v různých bodech . . . 47
Rovnovážné polohy a stabilita . . . 50
Jednoduché stroje . . . 51
Kinetická energie tuhého tělesa . . . 53

7. Mechanika tekutin . . . 55
Tlak v tekutinách . . . 55
Tlak vyvolaný vlastní tíhou kapaliny či plynu . . . 56
Vztlaková síla v kapalinách . . . 57
Proudění kapalin a plynů . . . 59

8. Termika, termodynamika, molekulová fyzika . . . 64
Kinetická teorie látek . . . 64
Teplota . . . 65
Struktura látek . . . 66

Vnitřní energie, práce, teplo . . . 66
Termodynamické zákony . . . 68
Výpočet tepla, kalorimetrická rovnice . . . 69

9. Struktura a vlastnosti plynů . . . 71
Ideální plyn . . . 71
Veličiny a konstanty popisující ideální plyn . . . 71
Střední kvadratická rychlost, tlak plynu . . . 72
Stavová rovnice ideálního plynu . . . 73
Děje s ideálním plynem . . . 74
Práce plynu . . . 76
Kruhový děj s ideálním plynem . . . 77
Tepelné motory . . . 78
Stavová rovnice reálného plynu . . . 81

10. Struktura a vlastnosti kapalin . . . 82
Povrchová vrstva kapalin . . . 82
Jevy na rozhraní kapaliny a nádoby, kapilární jevy . . . 84
Objemová teplotní roztažnost kapalin . . . 86

11. Struktura a vlastnosti pevných látek . . . 87
Krystalová mřížka . . . 87
Deformace pevných látek . . . 89
Teplotní roztažnost pevných látek . . . 90

12. Změny skupenství . . . 93
Tání a tuhnutí . . . 93
Skupenské teplo . . . 94
Sublimace a desublimace . . . 94
Vypařování a kapalnění (kondenzace) . . . 94
Fázový diagram . . . 96
Vodní pára v atmosféře . . . 97

13. Mechanické kmitání . . . 98
Mechanický oscilátor . . . 98
Kinematika harmonického kmitání . . . 98
Skládání kmitavých pohybů . . . 99
Dynamika harmonického kmitání . . . 101
Energie v oscilátoru . . . 103
Nucené kmitání oscilátoru . . . 104

14. Mechanické vlnění, zvuk . . . 105
Vznik a druhy vlnění . . . 105
Rovnice postupné vlny . . . 106
Interference vlnění . . . 106
Stojaté vlnění . . . 107
Šíření vlnění v izotropním prostředí . . . 108
Odraz, lom a ohyb vlnění . . . 109
Zvuk . . . 109

15. Elektrický náboj a elektrické pole . . . 112
Základní vlastnosti elektrického náboje . . . 112
Elektrická síla, Coulombův zákon . . . 112
Intenzita elektrického pole . . . 114
Práce v elektrickém poli . . . 115
Vodiče a izolanty v elektrickém poli . . . 117

16. Elektrický proud v látkách . . . 120
Elektrický proud, obvod, zdroj . . . 120
Elektrický proud v kovech . . . 121
Elektrický proud v polovodičích . . . 125
Elektrický proud v kapalinách . . . 129
Elektrický proud v plynech a ve vakuu . . . 131

17. Magnetické pole . . . 133
Stacionární magnetické pole . . . 133
Nestacionární magnetické pole . . . 138

18. Střídavý proud . . . 142
Obvod střídavého proudu s rezistorem (R) . . . 143
Obvod střídavého proudu s cívkou (L) . . . 144
Obvod střídavého proudu s kondenzátorem (C) . . . 144
Složený obvod střídavého proudu (RLC) . . . 145
Přehled obvodů střídavého proudu . . . 147
Výkon střídavého proudu . . . 148
Střídavý proud v energetice . . . 148

19. Elektromagnetické kmitání a vlnění . . . 152
Elektromagnetický oscilátor . . . 152
Elektromagnetické vlnění . . . 154
Energie elektromagnetického záření . . . 156

20. Optika . . . 161
Základní pojmy . . . 161
Vlnová optika . . . 164
Geometrická optika . . . 169

21. Speciální teorie relativity . . . 180
Principy speciální teorie relativity . . . 180
Relativistická kinematika . . . 180
Relativistická dynamika . . . 183

22. Kvantová fyzika . . . 185
Fotoelektrický jev . . . 185
Comptonův jev . . . 186
Vlnové vlastnosti částic . . . 187

23. Fyzika atomu . . . 188
Modely atomu . . . 188
Elektronový obal . . . 190
Jádro atomu . . . 195
Částice . . . 199

24. Vesmír . . . 201
Země . . . 201
Sluneční soustava . . . 205
Hvězdy . . . 207
Vesmír . . . 209

REJSTŘÍK . . . 210

POUŽITÉ A DOPORUČENÉ ZDROJE A LITERATURA . . . 215

1. FYZIKÁLNÍ VELIČINY, JEDNOTKY, MĚŘENÍ

Fyzika se zabývá studiem hmotných objektů. K popisu vlastností těchto objektů a jejich změn využíváme **fyzikální veličiny**. Fyzikální veličiny označujeme zavedenými (dohodnutými) značkami – latinskými i řeckými písmeny. Často jde o první písmena anglických názvů veličin, např. hmotnost – *m* – mass, rychlost – *v* – velocity.
Hodnota fyzikální veličiny je určena číselnou hodnotou a příslušnou jednotkou. Bez uvedení jednotek nemá samotná číselná hodnota smysl.

$$X \quad = \quad \{X\} \quad \cdot \quad [X]$$

fyzikální veličina

číselná hodnota
(kvantita)

fyzikální jednotka
(kvalita)

Rozdělení fyzikálních veličin a jednotek

Vzhledem k tomu, že spolu různé fyzikální veličiny souvisí, došlo k vytvoření uspořádané soustavy fyzikálních veličin a tomu odpovídající soustavy jednotek. Tuto soustavu z roku 1960 nazýváme **Mezinárodní soustavou jednotek neboli soustavou SI** (zkratka SI pochází z francouzského názvu) a základní jednotky jsou v ní definovány na základě pevně daných hodnot přírodních konstant.
Soustavu SI tvoří sedm základních jednotek, jednotky odvozené (včetně dvou doplňkových), dále jednotky násobné a dílčí. Kromě jednotek SI se ještě z praktických důvodů používají vedlejší jednotky, jejichž zavedení je dáno normou ČSN ISO 80000-1 Veličiny a jednotky.

Základní veličiny a jednotky

Veličina	Zkratka veličiny	Jednotka	Zkratka jednotky
Délka	*s, l, h*	metr	m
Hmotnost	*m*	kilogram	kg
Čas	*t*	sekunda	s
Termodynamická teplota	*T*	kelvin	K
Elektrický proud	*I*	ampér	A
Látkové množství	*n*	mol	mol
Svítivost	*I*	kandela	cd

Přesné definice těchto jednotek je možné nalézt např. v Matematických, fyzikálních a chemických tabulkách (dále jen MFCH tabulkách).

Odvozené a doplňkové jednotky

Základní jednotky doplňují **dvě doplňkové jednotky** radián (rad) pro rovinný úhel a steradián (sr) pro prostorový úhel. Jednotky rovinného a prostorového úhlu nemůžeme vyjádřit pomocí základních jednotek a jsou tzv. bezrozměrné, tedy mají rozměr 1 a jednotku 1, která se obvykle ani nepíše. Definici úhlu velikosti jednoho radiánu naleznete v kapitole Rovnoměrný pohyb po kružnici (str.19).

Další **odvozené jednotky** jsou odvozeny ze základních jednotek, tzn. že je vytváříme pomocí jednotek základních a operací násobení a dělení. Běžně používáme jednotku rychlosti metr za sekundu $\left(\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right)$, jednotku plochy metr čtverečný (m^2), jednotku objemu metr krychlový (m^3), jednotku hustoty kilogram na metr krychlový $\left(\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}\right)$ apod. Významné veličiny získaly pro odvozené jednotky speciální označení, často se jmenují podle význačných fyziků. Co se např. skrývá za jednotkou newton či joule se dozvíte v příslušné kapitole o síle či práci a energii. Odvozování jednotek můžeme využít při sledování vztahu mezi veličinami či k rozměrové zkoušce při výpočtech, jak si ukážeme dále.

Násobné a dílčí jednotky

Násobné a dílčí jednotky vytváříme ze základních jednotek užitím dekadických předpon. Ty nejčastěji užívané jsou uvedeny v tabulce. Další předpony naleznete v MFCH tabulkách.

Předpona	Značka	Název	Násobek	Mocnina deseti
Tera	T	bilion	1 000 000 000 000	10^{12}
Giga	G	miliarda	1 000 000 000	10^{9}
Mega	M	milion	1 000 000	10^{6}
kilo	k	tisíc	1 000	10^{3}
hekto	h	sto	100	10^{2}
deka	da	deset	10	10^{1}
–	–	jedna	1	10^{0}
deci	d	desetina	0,1	10^{-1}
centi	c	setina	0,01	10^{-2}
mili	m	tisícina	0,001	10^{-3}
mikro	μ	miliontina	0,000 001	10^{-6}
nano	n	miliardtina	0,000 000 001	10^{-9}
piko	p	biliontina	0,000 000 000 001	10^{-12}

Poznámka: Předpona deka se užívá k vyjádření jednotky hmotnosti, 1 dekagram by se měl správně značit 1 dag, z historického hlediska se stále užívá označení 1 dkg (především v receptech, v kuchařských knihách apod.).

Vedlejší jednotky

Používají se např. pro čas, objem, hmotnost, úhel. Některé vztahy mezi vedlejšími a základními jednotkami jsou v tabulce:

Veličina	Jednotka vedlejší	Značka	Vztah k jednotce základní
Čas	minuta	min	1 min = 60 s
Čas	hodina	h	1 h = 60 min = 3 600 s
Čas	den	d	1 d = 24 h = 86 400 s
Rovinný úhel	úhlový stupeň	°	$1° = (\pi/180)$ rad
Rovinný úhel	úhlová minuta	′	$1' = (1/60)° = (\pi/10800)$ rad
Plošný obsah	ar	ar	1 ar je obsah čtverce o hraně 10 metrů; $1\ \text{ar} = 10^2\ \text{m}^2 = 100\ \text{m}^2$
Plošný obsah	hektar	ha	$1\ \text{ha} = 100\ \text{ar} = 10^4\ \text{m}^2$
Objem	litr	l	$1\ \text{l} = 1\ \text{dm}^3 = 10^{-3}\ \text{m}^3$
Hmotnost	tuna	t	1 t = 1 000 kg
Teplota	Celsiův stupeň	°C	1 °C ≘ 1 K
Tlak	atmosféra	atm	1 atm = 101 325 Pa
Tlak	bar	bar	$1\ \text{bar} = 10^5\ \text{Pa}$

Výpočet ▾

$1\,200\ \mu\text{m} = 1{,}2\ \text{mm} = 0{,}001\,2\ \text{m}$

$48\ \text{cm}^2 = 0{,}48\ \text{dm}^2 = 0{,}004\,8\ \text{m}^2$

$5{,}5\ \text{dm}^3 = 5{,}5\ \text{l}$

$2{,}5\ \text{t} = 2\,500\ \text{kg}$

$0{,}053\ \text{GW} = 53\ \text{MW} = 53\,000\,000\ \text{W}$

$15\ \text{min} = \frac{15}{60}\ \text{h} = 0{,}25\ \text{h}$

$18\ \text{min} = \frac{18}{60}\ \text{h} = \frac{3}{10}\ \text{h} = 0{,}3\ \text{h}$

$72\ \frac{\text{km}}{\text{h}} = 20\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$

$5{,}6\ \text{km} = 5\,600\ \text{m}$

$1{,}6\ \text{ha} = 16\,000\ \text{m}^2$

$1{,}3\ \text{hl} = 130\ \text{l} = 130\ \text{dm}^3 = 0{,}13\ \text{m}^3$

$0{,}36\ \text{MJ} = 360\ \text{kJ} = 360\,000\ \text{J}$

$0{,}85\ \mu\text{F} = 850\ \text{nF} = 850\,000\ \text{pF}$

$2{,}3\ \text{h} = 2{,}3 \cdot 3\,600\ \text{s} = 8\,280\ \text{s}$

$3\,500\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 3{,}5\ \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$

$17\ \frac{\text{m}}{\text{s}} = 61{,}2\ \frac{\text{km}}{\text{h}}$

Při fyzikálních výpočtech do vztahů dosazujeme hodnoty veličin v jednotkách SI.

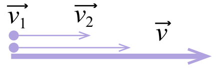
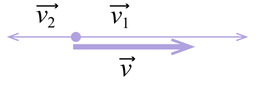
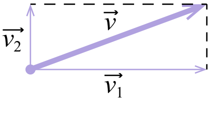
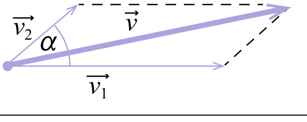
Skalární a vektorové fyzikální veličiny

Všechny fyzikální veličiny můžeme rozdělit do dvou skupin:

- **Skalární veličiny** jsou určené pouze velikostí a jednotkou. Např. hmotnost m, délka l, čas t, elektrický proud I, práce W, energie E.
- **Vektorové veličiny** jsou kromě velikosti a jednotky určené i směrem. Pro jejich znázornění používáme vektory, tedy orientované úsečky. Pro označení vektorové veličiny zakreslujeme nad její značku malou šipku. Např. síla $\vec{F}$, rychlost $\vec{v}$, zrychlení $\vec{a}$, úhlová rychlost $\vec{\omega}$. Při znázornění pak délka orientované úsečky odpovídá velikosti vektorové veličiny, její orientace určuje směr vektorové veličiny. Vektorové fyzikální veličiny mohou nabývat i záporných hodnot, znaménko minus vyjadřuje, že směr dané veličiny je opačný než nějaké jiné (např. odporová síla proti směru pohybu).

Operace s vektory

Vektory umístěné do jednoho bodu můžeme sčítat, resp. odčítat. Obecně zapíšeme, že výsledný vektor je vektorovým součtem $\vec{v} = \vec{v_1} + \vec{v_2}$.
Při výpočtu kromě prostého **součtu či rozdílu** použijeme dle situace i Pythagorovu nebo kosinovou větu. Tento postup později využijeme při skládání rychlostí nebo při skládání sil působících v jednom bodě.

Situace	Výslednice – graficky	Výslednice – početně
Vektory ve stejném směru		$v = v_1 + v_2$
Vektory v opačném směru		$v = v_1 - v_2$
Vektory v kolmém směru		$v = \sqrt{v_1^2 + v_2^2}$
Vektory svírají úhel		$v = \sqrt{v_1^2 + v_2^2 + 2v_1 v_2 \cos\alpha}$

Součin vektoru a skaláru je opět vektor: $\vec{v} = k \cdot \vec{v_1}$, kde $k \in \mathbb{R} - \{0\}$. Pokud je $k > 0$, směry původního i násobného vektoru jsou stejné. Pokud je $k < 0$, jsou směry původního a násobného vektoru opačné. Např. $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$, síla $\vec{F}$ uděluje tělesu hmotnosti m (vždy kladná) zrychlení $\vec{a}$ ve směru svého působení.

Výsledkem **skalárního součinu** dvou vektorů $\vec{v_1} \cdot \vec{v_2}$ je skalár $v = |\vec{v_1}| \cdot |\vec{v_2}| \cdot \cos\alpha$, kde α je úhel, který vektory svírají.

Výsledkem **vektorového součinu** dvou vektorů je vektor $\vec{v} = \vec{v_1} \times \vec{v_2}$, jehož velikost určíme ze vztahu $|\vec{v}| = |\vec{v_1}| \cdot |\vec{v_2}| \cdot \sin\alpha$. Směr výsledného vektoru je kolmý k rovině vektorů $\vec{v_1}$, $\vec{v_2}$ a je dán pravidlem pravé ruky: Zatočené prsty pravé ruky ukazují nad rovinou vektorů $\vec{v_1}$, $\vec{v_2}$ od vektoru $\vec{v_1}$ k vektoru $\vec{v_2}$, odtažený palec pak ukazuje směr výsledného vektoru $\vec{v}$. Proto také platí $\vec{v_1} \times \vec{v_2} = -(\vec{v_2} \times \vec{v_1})$.

Dělení vektorem není definováno, proto nemůžeme zapsat $t = \frac{\vec{v}}{\vec{a}}$. Správný zápis je $t = \frac{|\vec{v}|}{|\vec{a}|} = \frac{v}{a}$.

Měření fyzikálních veličin

Při ověřování hypotéz a vztahů se používají experimenty a měření. Při jejich vyhodnocení se využívá statistika a jiné matematické postupy. V současnosti se navíc využívají počítačové simulace.

Chyby měření

Každé měření fyzikální veličiny je zatíženo chybami. Jaké jsou příčiny chyb?

- **Systematická (soustavná) chyba** – vzniká nedokonalostí měřicích přístrojů a zařízení, nedokonalostí měřicích metod a také nedokonalostí našich smyslů. Systematické chyby omezíme použitím dokonalejších přístrojů a zlepšením měřicích metod.
- **Hrubá chyba** – vzniká nepozorností či omylem pozorovatele či selháním měřicího zařízení. Měření zatížené hrubou chybou se výrazně odlišuje od ostatních. Taková měření před zpracováním vyloučíme. Pro zpřesnění měření a vyloučení hrubých chyb je nutné měření dostatečněkrát opakovat.
- **Náhodná chyba** – vzniká působením náhodných vlivů. Výsledky opakovaných měření se v důsledku náhodné chyby mírně liší. Tyto chyby nelze odstranit. Můžeme jen dostatečným počtem opakovaných měření výsledek statisticky zpřesnit.

Zpracování a zápis výsledků

O každém měření napíšeme protokol, kam stručně, jasně a výstižně zaneseme popis měření a všechny okolnosti a podmínky. Výsledky opakovaných měření veličiny x ($x_1, x_2, \dots, x_n$) nejčastěji zpracujeme následujícím způsobem:

- Z naměřených hodnot určíme aritmetický průměr: $\overline{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i = \frac{(x_1 + x_2 + \dots + x_n)}{n}$
- Vypočítáme odchylku jednotlivých měření: $\Delta x_i = |\overline{x} - x_i|$
- Z těchto odchylek určíme průměrnou odchylku: $\Delta x = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \Delta x_i$
- Stanovíme průměrnou relativní odchylku: $\delta x = \frac{\Delta x}{\overline{x}} \cdot 100\,\%$, která charakterizuje přesnost měření a neměla by přesáhnout 1 %.

Výsledek měření veličiny x pak zapisujeme ve tvaru: $x = \overline{x} \pm \Delta x$

Při zpracování výsledků se používají ještě další metody a jiné postupy, např. metoda nejmenších čtverců či směrodatná odchylka k vyloučení mezní chyby. To však přesahuje rámec této publikace.

2. MECHANIKA – KINEMATIKA

Mechanika zkoumá mechanický pohyb fyzikálních objektů. Její podkapitolou je **kinematika**, která tyto pohyby popisuje, tedy zkoumá, **jak se objekty pohybují**.

Základní pojmy

Hmotný bod (dále **HB**) je modelem tělesa, u kterého

- zanedbáme rozměry, které při sledovaném ději nejsou podstatné,
- uvažujeme jeho hmotnost.

Příklad z praxe ▼

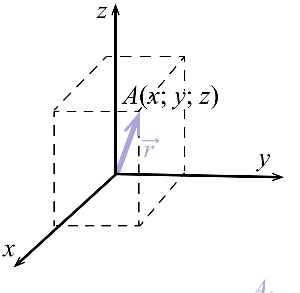
Při sledování pohybu auta na navigaci jsou rozměry auta vzhledem k uraženým vzdálenostem zanedbatelné. Auto se zobrazuje jako bod. Energii, kterou má i díky hmotnosti, ovšem uvažovat musíme.

Pohyb (resp. klid) je relativní, je třeba vždy vyjádřit, vůči čemu sledujeme pohyb tělesa, vůči jaké vztažné soustavě pohyb popisujeme. **Vztažnou soustavu** tvoří vztažné těleso (Země, Slunce, budova, automobil), soustava souřadnic s ním spojená a sledovaný čas. Nejčastěji volíme za vztažnou soustavu povrch Země nebo těleso s povrchem Země pevně spojené. Absolutní klid neexistuje.

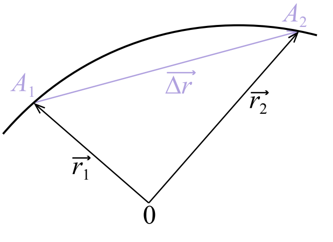
Příklad z praxe ▼

Stojíme na jedoucích pohyblivých schodech. Vůči člověku stojícímu na schodech za námi jsme v klidu (v relativním klidu). Vůči budově, ve které jsou schody instalovány, jsme v pohybu (v relativním pohybu).

K popisu **polohy hmotného bodu** A používáme **souřadnice**, nejčastěji pravoúhlou soustavu souřadnic. Polohu HB můžeme určit také pomocí **polohového vektoru** $\vec{r}$, jehož počátečním bodem je počátek soustavy souřadnic a koncovým bodem bod A. Pokud má v takové soustavě daný bod A souřadnice $A\ [x; y; z]$, pak jeho vzdálenost r od počátku soustavy souřadnic určíme ze vztahu $r = |\vec{r}\,| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$.



Při pohybu HB dochází ke změně polohového vektoru $\Delta\vec{r}$. Při přemístění tělesa z bodu A_1 do bodu A_2 je tato změna vyjádřena rozdílem polohových vektorů $\Delta\vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$.



Rozlišujeme trajektorii a dráhu. **Trajektorii** můžeme definovat dvěma způsoby:

- Souhrn poloh, do kterých se těleso během pohybu dostalo.
- Stopa pohybu = geometrická čára, kterou HB při pohybu opisuje.

Příklad z praxe ▼

Molitanovou kuličku namočíme do inkoustové barvy a trajektorií je potom křivka, kterou za sebou nabarvená kulička zanechá při pohybu na podložce. Trajektorií je i lesklá stopa, kterou za sebou zanechává hlemýžď.

Dráha je potom délka trajektorie, kterou HB urazil za určitý čas. Dráhu značíme s a udáváme ji v metrech.

Rychlost hmotného bodu vyjadřuje změnu polohy HB za jednotku času. Se změnou polohy se mění i velikost a směr polohového vektoru.

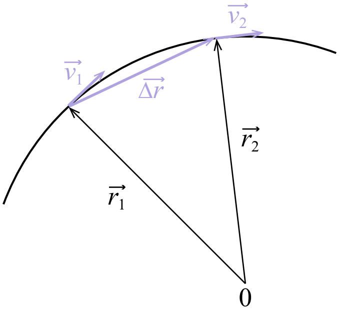
Průměrnou rychlost v_p definujeme jako podíl dráhy Δs, kterou hmotný bod urazil za čas Δt, a tohoto času. Symbolem Δ vyjadřujeme jakoukoliv změnu dané veličiny, tedy rozdíl mezi koncovou a počáteční hodnotou, např. $\Delta s = s_2 - s_1$, kde s_1 je stav na tachometru před jízdou a s_2 stav po jízdě. Průměrná rychlost je skalární veličina.

$$v_P = \frac{s_2 - s_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

Jednotkou rychlosti je $[v] = \frac{[s]}{[t]} = \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} = \mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}$ (metr za sekundu). Další používanou jednotkou je km/h (kilometr za hodinu), km/s (kilometr za sekundu). Převodní vztah: $1\,\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1} = 3{,}6\,\mathrm{km} \cdot \mathrm{h}^{-1}$

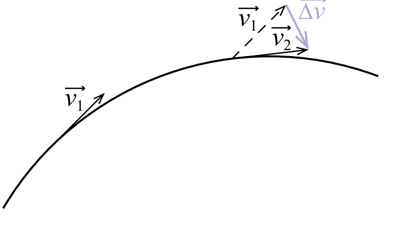
Okamžitou rychlost $\vec{v}$ definujeme jako změnu polohového vektoru $\Delta\vec{r}$ ve velmi krátkém čase Δt. Okamžitá rychlost je vektorová veličina. Má vždy směr tečny k trajektorii a orientaci ve směru změny polohového vektoru.

$$\vec{v} = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}, \text{ kde } t \to 0$$



Zrychlení $\vec{a}$ popisuje změnu vektoru rychlosti $\Delta\vec{v}$, která nastala v čase Δt. Může se jednat o změnu velikosti i o změnu směru rychlosti. Zrychlení je vektorová veličina.

$$\vec{a} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}, \text{ kde } \Delta t \to 0$$



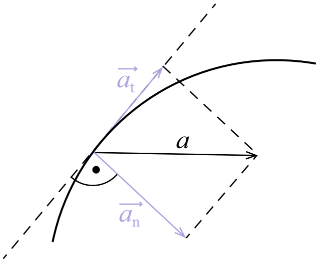
Jednotkou zrychlení je $[a] = \frac{[v]}{[t]} = \frac{\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}}{\mathrm{s}} = \mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-2}$ (metr za sekundu na druhou).

Vektor okamžitého zrychlení můžeme rozložit na dvě navzájem kolmé složky:

- **tečné zrychlení $\vec{a}_t$** – je rovnoběžné s tečnou trajektorie, vyjadřuje změnu velikosti rychlosti v čase např. při brzdění či rozjíždění. Při rovnoměrném pohybu je $a_t = 0$;
- **normálové zrychlení $\vec{a}_n$** – je kolmé na tečnu trajektorie, vyjadřuje změnu směru rychlosti. Vzniká jen při křivočarých pohybech, při přímočarém pohybu je $a_n = 0$.

Pro tyto složky platí:

$$\vec{a} = \vec{a}_t + \vec{a}_n, \ |\vec{a}| = a = \sqrt{a_t^2 + a_n^2}$$



Výpočet ▼

Při cestování po venkově je poměr délek silnic v obcích a mimo ně zhruba v poměru 1 : 3. Jakou nejvyšší průměrnou rychlostí se může pohybovat automobil při dodržení maximální rychlosti v obci a mimo ni?

Maximální rychlost v obci $v_1 = 50$ km/h, maximální rychlost mimo obec $v_2 = 90$ km/h.

$v_1 = 50$ km/h
$v_2 = 90$ km/h
$v_P = \ ?$ km/h

Úlohu můžeme řešit obecně, nebo si zvolit konkrétní úseky dráhy.

Obecně:

$s_1 = x$ km (úsek v obci)

$s_2 = 3x$ km (úsek mimo obec)

$t_1 = \frac{x}{v_1} = \frac{x}{50}$ h (čas v obci)

$t_2 = \frac{3x}{v_2} = \frac{3x}{90}$ h $= \frac{x}{30}$ h (čas mimo obec)

$$v_P = \frac{s}{t} = \frac{s_1 + s_2}{t_1 + t_2} = \frac{x + 3x}{\frac{x}{50} + \frac{x}{30}} = \frac{1800}{24} = 75 \text{ km/h}$$

Při volbě konkrétní vzdálenosti:

V obci ujedu např. 50 km během 1 hodiny a k tomu mimo obec třikrát delší úsek 150 km během $1,\overline{6}$ hod. Průměrnou rychlost určíme jako podíl celkové dráhy a celkového času.

$$v_P = \frac{s}{t} = \frac{200}{2,\overline{6}} = 75 \text{ km/h}$$

Maximální průměrná rychlost při cestování po venkově je 75 km/h.

Rozdělení pohybů

Podle trajektorie rozlišujeme:

- **pohyb přímočarý** – HB se pohybuje po přímce a vektor okamžité rychlosti má stále stejný směr (ve směru přímky);
- **pohyb křivočarý** – vektor okamžité rychlosti během pohybu mění směr a v každém okamžiku je tečný ke křivce trajektorie.

Podle velikosti okamžité rychlosti rozlišujeme:

- **pohyb rovnoměrný** – velikost vektoru rychlosti se nemění (může se měnit jeho směr);
- **pohyb nerovnoměrný** – velikost rychlosti se mění.

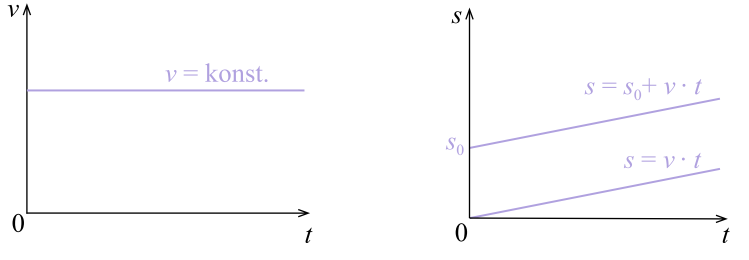
Rovnoměrný přímočarý pohyb

Jedná se o nejjednodušší pohyb, při kterém se těleso pohybuje stálou nenulovou rychlostí po přímce ($\vec{v} = \overrightarrow{konst.}$).

Dráha *s* uražená tělesem při pohybu je přímo úměrná času, po který pohyb probíhal.

- Při nulové počáteční dráze ($s_0 = 0$): $s = vt$
- Při nenulové počáteční dráze ($s_0 \neq 0$): $s = s_0 + vt$

Grafické znázornění závislosti veličin:



Výpočet ▾

Dva kamiony se předjíždějí, první jede rychlostí 80 km/h, druhý rychlostí 90 km/h. Délka každého kamionu s přívěsem je téměř 20 metrů, druhý kamion začne předjíždět, když je zhruba 5 metrů za prvním a zařadí se opět 5 metrů před něj. Jak dlouho celé předjíždění trvá? Jakou vzdálenost během přejíždění urazí rychlejší kamion?

$v_1 = 80$ km/h
$v_2 = 90$ km/h $= 25$ m/s
$t = ?$ s
$s = ?$ m

vzájemná rychlost: $v = v_2 - v_1 = 10$ km/h $= 2{,}\overline{7}$ m/s

délka, kterou rychlejší kamion ujede vůči pomalejšímu: $l = 5 + 20 + 20 + 5 = 50$ m

doba předjíždění: $t = \dfrac{l}{v} = \dfrac{50\,\text{m}}{2{,}\overline{7}\ \text{m/s}} = 18\ \text{s}$

dráha ujetá rychlejším kamionem: $s = v_2 t = 25 \cdot 18 = 450$ m

Předjíždění trvá 18 sekund a během nich ujede rychlejší kamion 450 metrů.

Rovnoměrně zrychlený přímočarý pohyb

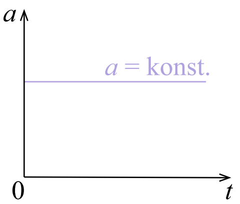
Rychlost při rovnoměrně zrychleném přímočarém pohybu je přímo úměrná času. Platí:

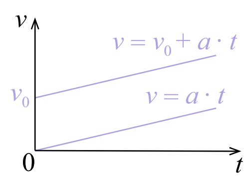
- $v = a \cdot t$, při nulové počáteční rychlosti ($v_0 = 0$);
- $v = v_0 + a \cdot t$, při nenulové počáteční rychlosti ($v_0 \neq 0$).

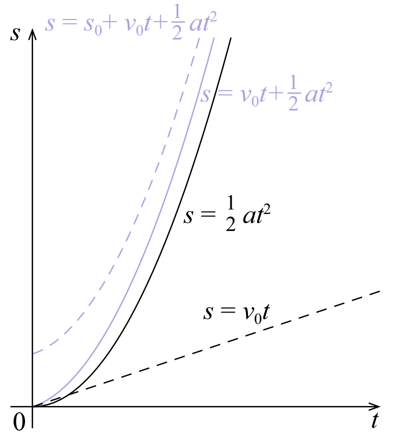
Dráha při rovnoměrně zrychleném přímočarém pohybu je definována vztahy, ve kterých v_0 je počáteční rychlost a s_0 je počáteční dráha:

- $s = \frac{1}{2}at^2$, pro $v_0 = 0,\ s_0 = 0$;
- $s = v_0 t + \frac{1}{2}at^2$, pro $v_0 \neq 0,\ s_0 = 0$;
- $s = s_0 + v_0 t + \frac{1}{2}at^2$, pro $v_0 \neq 0,\ s_0 \neq 0$.

Grafické znázornění závislosti veličin:







Výpočet ▼

Vzletová rychlost letadla závisí na síle větru. Boeing 737 zpravidla vzlétne při rychlosti 250 km/h. Ke vzletu potřebuje dráhu delší než 2 kilometry. Jakou dráhu by k dosažení této rychlosti potřeboval vůz Bugatti Veyron Grand Sport, který patří k sériově vyráběným vozům s největším zrychlením, protože stovky (rychlosti 100 km/h) dosáhne za 2,5 sekundy?

$v = 250\ \text{km/h} = 69{,}\overline{4}\ \text{m/s}$

$v' = 100\ \text{km/h} = 27{,}\overline{7}\ \text{m/s}$

$t' = 2{,}5\ \text{s}$

$a = ?\ \text{m/s}^2$

$\underline{s = ?\ \text{m}}$

Zrychlení auta: $a = \dfrac{v'}{t'} = \dfrac{27{,}\overline{7}}{2{,}5} = 11{,}\overline{1}\ \text{m/s}^2$

Neznáme dobu t, za kterou auto dosáhne požadovanou rychlost v,

v dalším vztahu proto nahradíme $t = \dfrac{v}{a}$

$$s = \frac{1}{2}at^2 = \frac{1}{2}a\left(\frac{v}{a}\right)^2 = \frac{v^2}{2a} = \frac{(69{,}\overline{4})^2}{2 \cdot 11{,}\overline{1}} \doteq 217\ \text{m}$$

Bugatti Veyron Grand Sport dosáhne vzletové rychlosti Boeingu 737 na dráze 217 metrů.

Rovnoměrně zpomalený přímočarý pohyb

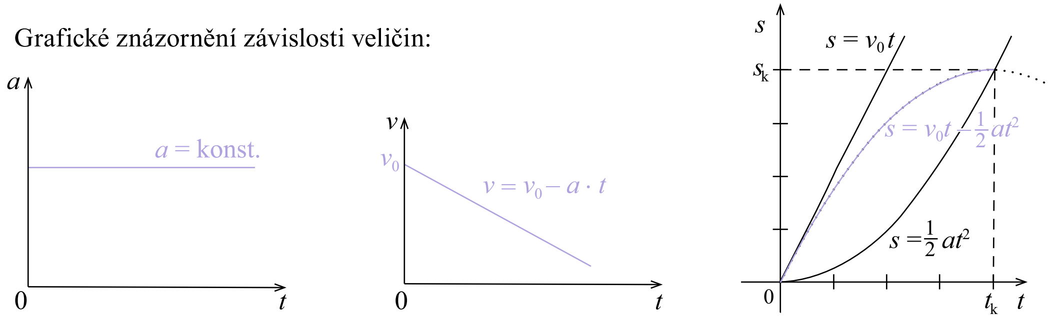
Počáteční rychlost je nenulová, $v_0 \neq 0$. Např. jedoucí auto začne brzdit.
Pro **rychlost** při rovnoměrně zpomaleném přímočarém pohybu platí:

- $v = v_0 - a \cdot t$

Dráha při rovnoměrně zpomaleném přímočarém pohybu je definována vztahy, ve kterých v_0 je počáteční rychlost a s_0 je počáteční dráha:

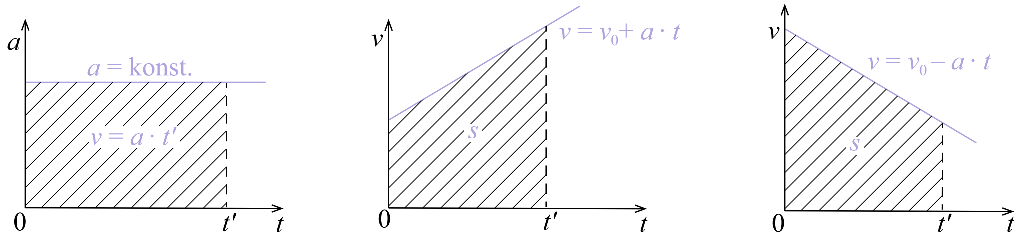
- $s = v_0 t - \frac{1}{2}at^2$, pro $v_0 \neq 0,\ s_0 = 0$
- $s = s_0 + v_0 t - \frac{1}{2}at^2$, pro $v_0 \neq 0,\ s_0 \neq 0$

Grafické znázornění závislosti veličin:



Těleso se zcela zastaví v čase t_k na brzdné dráze s_k.

Geometrický a fyzikální význam plochy:



Výpočet ▼

Jaká bude brzdná dráha automobilu jedoucího rychlostí 50 km/h, jestliže předpokládáme maximální zpomalení 5 m/s^2? Za jak dlouho auto zcela zastaví? Jak se změní brzdná dráha auta, jestliže unavený řidič zareaguje na situaci se zpožděním 1 s?

$v_0 = 50\ \text{km/h} = 13{,}\overline{8}\ \text{m/s}$
$v = 0\ \text{m/s}$
$a = 5\ \text{m/s}^2$
$t = ?\ \text{s}$
$s = ?\ \text{m}$
$s_z = ?\ \text{m}$

Pro okamžitou rychlost při rovnoměrně zpomaleném pohybu platí vztah $v = v_0 - at$.

Vyjádříme čas: $t = \dfrac{v_0 - v}{a} = \dfrac{13{,}\overline{8}}{5} = 2{,}\overline{7}$ s

Brzdná dráha od začátku brzdění: $s = v_0 t - \dfrac{1}{2}at^2 = 13{,}\overline{8} \cdot 2{,}\overline{7} - \dfrac{1}{2} \cdot 5 \cdot (2{,}\overline{7})^2 \doteq 19{,}3\,\mathrm{m}$

Při zpoždění ujede auto za 1 s ještě $13{,}\overline{8}$ m a pak teprve začne brzdit, $s_z = 33{,}2$ m.
K samotnému brzdění dojde na dráze 19,3 metru. Díky únavě řidiče vzroste brzdná dráha až na 33,2 metru.

Volný pád

Příkladem rovnoměrně zrychleného pohybu je volný pád. Jedná se o pohyb volně puštěného tělesa svisle dolů s tíhovým zrychlením g. V našich zeměpisných šířkách je hodnota $g = 9{,}81\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$.
Volně puštěným tělesem rozumíme těleso s nulovou počáteční rychlostí.
Platí vztahy pro rychlost a dráhu vycházející ze vztahů pro rovnoměrně zrychlený přímočarý pohyb:

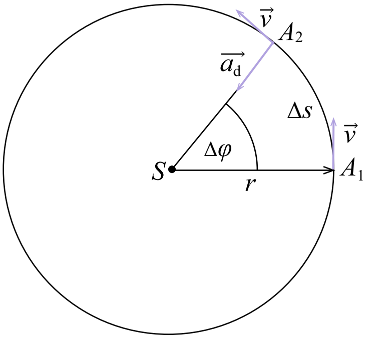
$$v = gt \qquad s = \frac{1}{2}gt^2$$

Rovnoměrný křivočarý pohyb

Jedná se o pohyb stálou rychlostí po křivce. Mění se pouze směr rychlosti, nikoliv její velikost. Proto je tečné zrychlení nulové a normálové zrychlení nenulové: $a_t = 0$, $a_n \neq 0$.
Z hlediska výpočtů řešíme pravidelné křivky, především kružnici.

Rovnoměrný pohyb po kružnici

Je speciálním případem rovnoměrného křivočarého pohybu. Kružnice je určena středem S a **poloměrem křivosti** $\boldsymbol{r}$. Průvodičem bodu A nazýváme spojnici bodu A se středem kružnice, délka **průvodiče** odpovídá poloměru kružnice.
Dráha $\Delta \boldsymbol{s}$ – vzdálenost, kterou bod A urazí za čas Δt po kružnici mezi polohami A_1 a A_2.



Úhlová dráha $\Delta\varphi$ – středový úhel, který za čas Δt opíše každý bod průvodiče. Udáváme ji v radiánech, $[\varphi]$ = rad. Jeden radián je definován jako úhel, kterému přísluší oblouk délky poloměru, 1 rad ≐ 57°. Při jednom oběhu opíše průvodič bodu A plný úhel 2π rad = 360°.
Pro **délku kruhového oblouku** platí $\Delta s = r \cdot \Delta\varphi$, pro celou délku kružnice $s = 2\pi r$.

Obvodová rychlost v – rychlost, kterou se hmotný bod pohybuje po kružnici, v každém okamžiku má směr tečny ke kružnici.

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} \qquad [v] = \text{m/s}$$

Příklad z praxe ▼

Tečný směr dokazují např. jiskry odletující od kotouče při řezání kovu. Jiskry jsou drobné rozžhavené částečky kovu, které se po uvolnění z kotouče pohybují v tečném směru.

Rovnoměrný pohyb po kružnici je pohyb periodický. Doba jednoho oběhu bodu A se nazývá **perioda**, značíme ji T a udáváme v sekundách $[T] = s$. Při pohybu po kružnici sledujeme, kolikrát bod A oběhne celou kružnici za sekundu. Tuto veličinu nazýváme **frekvence**, značíme f. Pro frekvenci používáme odvozenou jednotku hertz, což je počet oběhů za sekundu, tedy $[f] = s^{-1}$ = Hz. V praxi se frekvence otáčení často udává počtem otáček za minutu.

Vztah mezi periodou a frekvencí

$$f = \frac{1}{T} \qquad [T] = \text{s} \qquad [f] = \text{s}^{-1} = \text{Hz}$$

Úhlová rychlost ω vyjadřuje, jakou úhlovou dráhu $\Delta\varphi$ urazil bod A za čas Δt.

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} \qquad [\omega] = \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

Použijeme-li plný úhel a dobu jednoho oběhu, získáme vztah: $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$

Vztah mezi úhlovou a obvodovou rychlostí

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{r \cdot \Delta\varphi}{\Delta t} = r \cdot \omega \qquad \text{nebo} \qquad v = \frac{2\pi r}{T} = 2\pi r f = r \cdot \omega$$

Při rovnoměrném pohybu po kružnici platí, že všechny body celého kruhového kotouče se pohybují se stálou úhlovou rychlostí. Obvodová rychlost závisí na vzdálenosti bodu od osy otáčení, tedy na poloměru odpovídající kružnice.

$$\omega = konst. \qquad v = \omega \cdot r$$

Tečné a normálové zrychlení

Vektor zrychlení $\vec{a}$ má dvě složky, tečnou a normálovou. Tečné zrychlení $\vec{a}_t$ má směr tečny v daném bodě trajektorie, normálové zrychlení $\vec{a}_n$ má směr kolmý k tečně. Platí $\vec{a} = \vec{a}_t + \vec{a}_n$.
Velikost zrychlení určíme pomocí Pythagorovy věty: $a = \sqrt{a_t^2 + a_n^2}$

Při rovnoměrném pohybu po kružnici se nemění hodnota obvodové rychlosti (tečné rychlení je nulové), ale mění se její směr (to vyjadřuje normálové zrychlení). Změnu směru rychlosti vyjadřuje **dostředivé (normálové) zrychlení $\vec{a}_d$**.

$$a_d = \frac{v^2}{r} = \omega^2 \cdot r$$

Výpočet ▾

Prádlo v pračce odstřeďuje při 1 200 otáčkách za minutu. Jakou rychlostí se pohybuje prádlo na stěně bubnu pračky vůči pozorovateli v koupelně, jestliže vnitřní průměr bubnu je 45 cm? Pro lepší představu převeďte rychlost i na km/h.

f = 1 200 ot/min = 20 ot/s = 20 Hz

d = 45 cm; r = 22,5 cm = 0,225 m

v = ?

$$v = \omega \cdot r = 2\pi f \cdot r = 2 \cdot \pi \cdot 20 \cdot 0{,}225 \doteq 28{,}3\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} \doteq 102\ \mathrm{km/h}$$

Prádlo se při odstřeďování pohybuje na stěně bubnu pračky rychlostí téměř 102 km/h.

3. MECHANIKA – DYNAMIKA

Dynamika zkoumá příčiny pohybu těles. Hledá odpovědi na otázky: proč a za jakých podmínek se tělesa pohybují. Nejčastější příčinou pohybu či změny pohybového stavu je silové působení okolních těles. Síla se v řečtině nazývá dynamis, proto se nazývá tato část mechaniky **dynamika**.

Síla, silové účinky

Síla popisuje **vzájemné působení** fyzikálních objektů. K působení síly dochází:

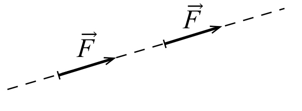
- při vzájemném dotyku těles;
- prostřednictvím silového pole (gravitační, elektrické, magnetické).

Síla je **vektorová fyzikální veličina**, značíme ji $\vec{F}$. Síla je jednoznačně určena působištěm, směrem a velikostí. Jednotkou síly je newton, $[F] = \mathrm{N}$.

Silové účinky na těleso jsou:

- deformační (statické) – změní se tvar tělesa;
- pohybové (dynamické) – změní se pohybový stav tělesa.

V kapitole dynamika se budeme zabývat **dynamickými účinky sil**.
Síly působící v jednom bodě můžeme skládat, tedy nahradit všechny působící síly jedinou silou, kterou nazýváme **výslednicí** a která má na těleso stejný účinek jako jednotlivé síly dohromady. Při skládání sil působících v jednom bodě (tedy se společným působištěm) postupujeme podle principu **skládání vektorů**.
Silový účinek zůstane stejný, i když působiště síly posuneme po **vektorové přímce**, tedy po přímce proložené vektorem síly.



Základní známé principy dynamiky zobecnil a shrnul anglický fyzik Isaac Newton (1643–1727) ve třech pohybových zákonech, které po něm nesou jméno.

První Newtonův pohybový zákon = zákon setrvačnosti

Každé těleso setrvává v klidu nebo v pohybu rovnoměrném přímočarém, pokud není nuceno vnějšími silami tento stav změnit.

Zavedeme model nazývaný **izolované těleso**, což je těleso, na které nepůsobí žádné vnější síly, resp. na těleso působí nulová výsledná síla. Díky tomuto modelu můžeme zanedbat odporové a třecí síly (pokud je v dané situaci zanedbat lze). Izolované těleso, které je ve vztažné soustavě v klidu, v klidu setrvá. Izolované těleso, které je v pohybu, má stále stejnou rychlost a pohybuje se pohybem rovnoměrným přímočarým. Této vlastnosti říkáme **setrvačnost**.

Příklad z praxe ▼

Izolované těleso, na které působí nulová výsledná síla, představuje auto jedoucí po rovném úseku dálnice se zapnutým tempomatem. Palubní počítač udržuje nastavenou rychlost díky tomu, že přidává jen takovou sílu motoru, aby kompenzoval odporové síly. Tím jsou vyrovnané síly ve vodorovném směru a dále je ve svislém směru tíhová síla kompenzovaná silou podložky (vozovky).

Vztažná soustava, ve které platí první Newtonův pohybový zákon, se nazývá **inerciální** (latinsky inercia = nečinnost). Každá další soustava, která je v klidu či v pohybu rovnoměrném přímočarém k inerciální soustavě, je také inerciální. Platí **mechanický princip relativity (Galileiho princip relativity)**: Zákony mechaniky jsou stejné ve všech inerciálních vztažných soustavách. Rovnice, které je vyjadřují, mají stejný tvar. Na základě mechanických pokusů není žádná inerciální vztažná soustava upřednostněna.

Vztažná soustava, ve které neplatí první Newtonův pohybový zákon, se nazývá **neinerciální** a vůči inerciální soustavě se pohybuje se zrychlením. V neinerciální soustavě působí setrvačné síly ve směru opačném, než je směr zrychlení vůči inerciální soustavě.

Příklad z praxe ▼

V rozjíždějícím se letadle nás setrvačná síla tlačí zpátky do sedadla. V brzdícím automobilu setrvačná síla způsobuje, že se předkláníme. V zatáčce se v autě působením setrvačné síly vykláníme ze sedadla směrem ze zatáčky.

Druhý Newtonův pohybový zákon = zákon síly

Zrychlení a, které uděluje síla F tělesu o stálé hmotnosti m, je přímo úměrné velikosti síly F a nepřímo úměrné hmotnosti tělesa m. Matematicky vyjádříme $a = \frac{F}{m}$.

Začne-li na těleso působit síla, změní se jeho pohybový stav. Síla tělesu udělí zrychlení ve směru působící síly: $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$

Vztah $F = m \cdot a$ nazýváme **pohybovou rovnicí** a díky ní můžeme vyjádřit jednotku newton.

$$[F] = [m \cdot a] = \mathrm{kg} \cdot \mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-2} = \mathrm{N}$$

Příklad z praxe ▼

Řidič jezdí určitým vozem. Při nasednutí do vozidla s poloviční hmotností, ale se stejně výkonným motorem si musí uvědomit, že při rozjíždění bude lehčí vůz „živější“, protože při stejné tažné síle motoru a poloviční hmotnosti automobilu bude zrychlení dvojnásobné.