

## Existuje odstredivá sila?

Odpoveď na túto zdanlivo jednoduchú otázku začneme na začiatku samotnej fyziky. Tam stojí neochvejne Isaac Newtona, ktorého mechanika sa stala vzorom pre výstavbu ostatných vied. Mechanika vysvetľuje príčiny mechanického pohybu a jeho zmien. Pri mechanickom pohybe dochádza k premiestňovaniu telies. Takýto pohyb je vždy relatívny – určený vzhlľadom na niečo, na nejakú vzťažnú, alebo súradnicovú, sústavu. Napríklad šofér auta nehybne sedí vzhlľadom na sedadlo, ale pohybuje sa vzhlľadom na strom, stojaci pri ceste. Potrebné je preto špecifikovať súradnicovú sústavu (SS), v ktorej pohyb určíme.

Základom mechaniky sú tri Newtonove pohybové zákony (NPZ) a ústredným pojmom je pojem sily.

**Zákon zotrvačnosti** – každé teleso zotrva v pokoji alebo v rovnomernom priamočiarom pohybe, kým nie je nútené silovým pôsobením iných telies tento pohybový stav zmeniť.

**Zákon sily** – sila pôsobiaca na teleso je úmerná zmene jeho rýchlosti za čas.

**Zákon akcie a reakcie** – sily, ktorými na seba pôsobia dve telesá, majú rovnakú veľkosť ale opačný smer.

1. NPZ nám hovorí, že najprirodzenejšou vlastnosťou telies je zotrvať v svojom pôvodnom pohybovom stave, ktorým je pokoj alebo rovnomerný priamočiary pohyb. Jediný spôsob, ako pohybový stav telesa zmeniť, je pôsobiť naň silou. Veľkosť pôsobiacej sily kvantifikuje 2. NPZ. Jeho matematická formulácia je  $F = ma$ , kde  $F$  je vektor sily,  $m$  je hmotnosť telesa a  $a$  je vektor zrýchlenia charakterizujúci zmenu rýchlosti – jej veľkosti a smeru.

Na špecifikovanie pohybu je potrebná SS. Ukazuje sa, že 1. NPZ (zákon zotrvačnosti) neplatí vo všetkých SS, ale len v ich špeciálnom type, označenom ako inerciálne SS. V inerciálnej SS sa bude teleso pohybovať rovnomerne priamočiario, prípadne bude zotrvať v pokoji až pokiaľ nebude nútené pôsobením iných telies svoj pohybový stav zmeniť. Pohyb telesa v týchto SS ovplyvňujú len sily, ktorých pôvod je vo vzájomnom pôsobení iných telies na dané teleso. S dostatočnou presnosťou sa za inerciálnu SS považuje sústava spojená so stredom Slnka a súradnicovými osami smerujúcimi k vhodným hviezdám. Pri výpočtoch za inerciálnu bežne považujeme aj SS spojenú s niektorým bodom povrchu Zeme. SS, v ktorých neplatí 1. NPZ (telesá menia svoj pohybový stav aj bez pôsobenia iných telies), nazývame neinerciálne. Ak existuje jediná inerciálna SS, existuje ich nekonečne veľa – každá SS, ktorá vzhlľadom k inerciálnej sústave stojí, alebo sa pohybuje rovnomerne priamočiario, je tiež inerciálna. Uvedme si príklad na ozrejmenie.

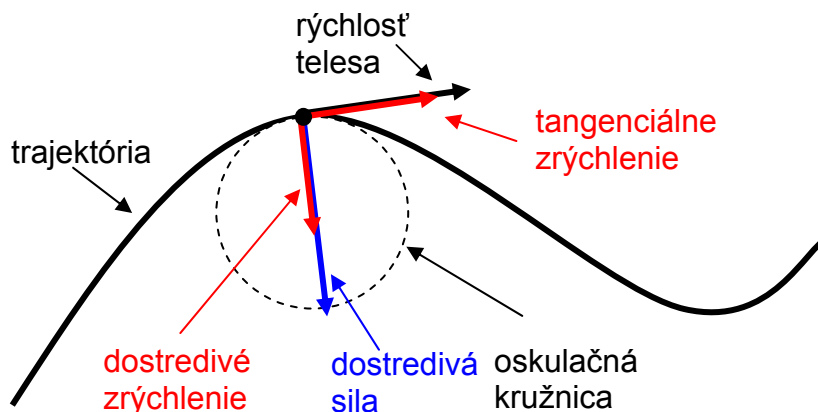
Predstavme si kozmickú loď, dostatočne vzdialenú od planét aj od Slnka, na ktorú nepôsobia nijaké sily. V rakete sú dvaja kozmonauti. Jeden sedí v pohodlnom kresle, druhý nehybne visí vo vzduchu. SS spojená so Slnkom je inerciálna a raketa bude vzhlľadom k Slnku stáť, alebo sa pohybovať rovnomerne po priamke – nepôsobí na ňu nijaká vonkajšia sila. SS spojená s takouto raketou bude tiež inerciálna. Ak na kozmonautov v rakete nebudú pôsobiť nijaké sily, budú vzhlľadom k rakete v pokoji (nebudú meniť svoj pohybový stav).

V istom okamihu kozmická loď zapne motory a začne sa pohybovať zrýchlene po pôvodnej priamke. Z pohľadu pozorovateľa spojeného so Slnkom sa začne kozmonaut, sediaci v kresle, pohybovať s rovnakým zrýchlením ako raketa. Musí naň pôsobiť sila a pozorovateľ ju identifikuje ako tlakovú silu, ktorou na kozmonauta tlačí kreslo. Visiaci kozmonaut bude naďalej v pôvodnom pohybovom stave voči Slnku. Steny rakety sa však začnú voči nemu pohybovať. Nakoniec naň narazia, čiže jeho rýchlosť voči Slnku sa bude meniť. Kým však sediaci kozmonaut pociťuje neustále tlak kresla, letiaci kozmonaut bude pociťovať silu len počas nárazov na steny rakety.

Kozmonauti v rakete budú zmenu po zapnutí motorov vnímať inak. Sediaci kozmonaut bude naďalej v pokoji. Pociťi však, že naň tlačí kreslo. Ako školený človek vie, že pôsobením sily by sa mal meniť jeho pohybový stav. Nič také sa však nedeje a on aj naďalej sedí v pokoji. Výsledná sila naň pôsobiaca musí byť nulová. Zavedie preto nový druh sily – kinematickú silu. Tá má rovnakú veľkosť, ako tlaková sila kresla, ale opačný smer. Aby kozmonaut vysvetlil svoj pokoj, musí zaviesť nový druh sily, ktorá nevzniká pôsobením iných telies, ale vplyvom pohybu SS. Ešte lepšie je to vidieť na druhom kozmonautovi. On zistí, že sa vzhlľadom k stenám rakety pohybuje so

zrýchlením. Vie, že so zrýchlením je vždy spojené pôsobenie sily. Aby to vysvetlil, musí zaviesť kinematickú silu, hoci on na svojom tele nijakú silu necíti ani naň nepôsobí iné teleso.

Rovnako je to aj so silou odstredivou. Majme raketu pohybujúcu sa okolo Slnka rovnomerne po kružnici. V rakete je (či už v kresle, alebo voľne „pohodený“) kozmonaut. Pozorovateľ spojený so Slnkom vidí, že sa smer rýchlosti rakety neustále mení. Musí preto existovať sila, spôsobujúca túto zmenu, lebo raketa má, podľa zákona zotrvačnosti, snahu zotrvať v rovnomernom priamočiariom pohybe. Táto sila musí smerovať do stredu kružnice a nazýva sa preto dostredivou. Jej pôvod býva rôzny – pri družici je dostredivou silou gravitácia. Ak by gravitácia prestala na družicu pôsobiť, uletela by rovnomernou rýchlosťou po priamke. Je to ako keď krúžite telesom, uviazaným na niti a zrazu niť pustíte. Teleso uletí v smere dotyčnice ku kružnici. V tomto prípade bola dostredivou silou sila vašej ruky, ktorá prostredníctvom nite pôsobila zmenu smeru rýchlosti telesa.



**Obr.** Pri ľubovoľnom krivočiariom pohybe vždy existuje dostredivá zložka sily a dostredivá zložka zrýchlenia, ktoré smerujú do stredu tzv. oskulačnej kružnice.

Rovnako to bude aj s kozmonautom. Pôsobí na neho gravitácia a jej vplyvom sa pohybuje po kružnici. Dá sa úplne všeobecne ukázať, že keď sa teleso pohybuje po zakrivenej trajektórii (môže byť ľubovoľne krivá), v každom momente naň pôsobí sila, smerujúca do stredu kružnice, ktorá sa dá preložiť malým úsekom trajektórie telesa – oskulačná kružnica (Obr.). V každom momente pohybu telesa existujú dve zložky jeho zrýchlenia: dostredivé, smerujúce do stredu oskulačnej kružnice, spôsobujúce zmenu smeru rýchlosti telesa a tangenciálne (dotyčnicové), smerujúceho v smere dotyčnice ku trajektórii, spôsobujúce zmenu veľkosti rýchlosti telesa (Obr.).

Ako sa na celú vec pozerá kozmonaut v rakete? Ten vie, že naň pôsobí gravitačná sila, no vzhľadom k rakete je v pokoji. Výsledná sila naň pôsobiaca musí byť nulová a on musí zaviesť kinematickú silu, ktorú nazve odstredivou. Tá má rovnakú veľkosť ako gravitačná sila ale opačný smer. Opäť je tu dôležitý rozdiel. Z hľadiska inerciálnej SS vysvetľujeme kruhový pohyb rakety a kozmonauta a potrebujeme nenulovú výslednú silu. Z hľadiska neinerciálnej sústavy vysvetľujeme státie kozmonauta a rakety, takže výsledná sila, ktorá na nich pôsobí, musí byť nulová.

Ak teda na otázku prečo raketa obieha okolo Slnka po kruhovej dráhe odpoviete že: „Pri obehú družice na ňu pôsobia sily – gravitačná príťažlivosť Slnka a odstredivá sila, ktoré sú pri kruhovom pohybe v rovnováhe“, odpovedali ste zle. Ak by na družicu pôsobili dve sily, ktorých účinok sa vykompenzuje, tak sa družica pohybuje rovnomerne priamočiario, alebo stojí. Podľa zadania totiž sledujeme pohyb družice v inerciálnej SS. V nej vyšetrujeme kruhový pohyb a musíme hľadať dostredivú silu! Aby sme mohli používať odstredivú silu, museli by sme prejsť do neinerciálnej SS, rotujúcej spolu s raketou. Aby sme správne vysvetlili pohyb telies v tejto sústave, museli by sme zaviesť kinematickú odstredivú silu, ktorej pôsobenie však telesá „necítia“. Družica by v tejto sústave stála na jedinom mieste – výsledná sila, pôsobiaca na družicu, by bola nulová.

A ešte jeden príklad. Ten považujú mnohí za nezvratný dôkaz existencie odstredivej sily – auto s posádkou, prechádzajúce rovnomernou rýchlosťou kruhovú zákrutu. Všetci vieme, že občas

sa takéto auto pri moc veľkej rýchlosti šmykne a vyletí zo zákruty. Všetci sme zažili, ako nás pri prechádzaní zákruty tlačí na dvere auta. Môžeme to vysvetliť bez odstredivej sily? Auto, ako každé iné teleso, má snahu zotrvať v rovnomernom priamočiari pohybe. Pri prechádzaní zákruty však musí smer rýchlosti meniť. Musí naň pôsobiť dostredivá sila. Dostredivou silou je v tomto prípade trecia sila medzi pneumatikami a asfaltom. Čím je toto trenie väčšie, tým rýchlejšie môžete prechádzať zákrutou. Preto sú také dôležité dobré pneumatiky a preto musí šofér pri mokrej ceste znížiť rýchlosť prechádzania zákrut (trecia sila medzi mokrou cestou a pneumatikou je menšia). Ak ide príliš rýchlo, veľkosť trecej sily nie je dostatočná na potrebnú zmenu smeru rýchlosti. Pri takejto rýchlosti by trecia danej veľkosti sila stačila na prechod zákruty s väčším polomerom. Čím je totiž polomer zákruty menší, tým väčšia dostredivá sila musí na teleso pôsobiť (viac sa musí meniť smer rýchlosti). Auto preto začne „vynášať“ – sleduje totiž kružnicu s väčším polomerom. Človek v aute je tiež len teleso. Jeho slobodná vôľa mu umožňuje porušovať morálne zákony ale zákony fyziky porušiť nemôže. Snaží sa preto zotrvať v priamočiari rovnomernom pohybe (už Vás s tým 1. NZP asi nudíme, ale naozaj sa bez neho nezaobídeme). Aby sa pohyboval v zákrute spolu s autom, musí naň pôsobiť dostredivá sila. V jeho prípade je dostredivá sila tlaková sila dverí. Netlačí teda do dverí preto, že je vynášaný odstredivou silou, ako si mnohí myslia.

Aby ste sa vyhli rôznym nepresnostiam a omylom riešte radšej príklady na kruhový pohyb z hľadiska inerciálnych SS. V nich nepotrebuje odstredivú silu. A ak by sa Vám aj náhodou zdalo, že odstredivú silu jasne vidíte, respektíve cítite, prejdite do inerciálnej sústavy, zamyslite sa a zistíte, že všetko je to trochu inak.

Na obhajobu čitateľov, ktorí nemajú aspoň dva semestre fyziky a s odstredivou a dostredivou silou sa im to stále pletie a pravdepodobnejšie sa im zdá, že auto v zákrute vytláča von odstredivá sila a že na družicu musí pôsobiť odstredivá sila, inak by spadla na Zem, treba povedať, že patria vlastne do celkom dobrého klubu. Aj v serióznych fyzikálnych knihách, učebniciach a zbierkach príkladov nájdeme podobné vysvetlenia. Jedným z prominentov, zastávajúcich odstredivú silu, bol aj zakladateľ modernej kozmonautiky Wernher von Braun. Ten v sérii populárnych článkov 60. rokoch minulého storočia vysvetľoval pohyb družíc po kruhových dráhach rovnováhou medzi odstredivou a gravitačnou silou. Nuž, aj ozajstní veľikáni majú svoje slabé miesta.

Peter Kluvánek