Nástraha pátá
Výtahy, vlaky, kolotoče, ...
aneb Co nás čeká v neinerciálních soustavách?

Úlohy, jimiž jsme se v předchozích ***Nástrahách*** zabývali, měly jedno společné: řešili jsme je ve vztažné soustavě spojené se Zemí a tuto (tzv. *laboratorní*) vztažnou soustavu jsme považovali za soustavu *inerciální*. Vztažné soustavy, které nás denně obklopují — a to nejen například rozjíždějící se či brzdící dopravní prostředky, ale přesně vzato také samotná Země[1] — však patří k soustavám *neinerciálním*. Existuje způsob, jak řešit úlohy z dynamiky hmotného bodu i v těchto soustavách? Víme přece, že Newtonovy zákony v nich neplatí!

Věci znalý čtenář prohlásí: "Nevadí — vezmeme v úvahu setrvačné (fiktivní) síly a budeme s nimi počítat jako se silami ostatními." Jakkoli se tento závěr může zdát jasný a výstižný, opět v sobě skrývá nástrahy: i s jednoduchými prostředky je totiž třeba umět dobře zacházet. O tom, že tomu tak není vždy, nás opět přesvědčují středoškolské učebnice, z nichž vybíráme první ukázku:

***Ukázka první — učebnicová* ([1.])**

V neinerciálních vztažných soustavách nezůstává izolované těleso v klidu nebo v rovnoměrném přímočarém pohybu. Na těleso v neinerciální vztažné soustavě působí setrvačná síla $\vec{F}_s = -m\vec{a}$*, vznikající jako důsledek zrychleného pohybu soustavy.*

⋮

Setrvačné síly existují jen v neinerciálních vztažných soustavách, v inerciálních nikoli. Setrvačné síly jsou pro pozorovatele v neinerciální vztažné soustavě reálné stejně jako síly vzájemného působení mezi tělesy a mohou se s těmito silami skládat.

Student si po pročtení učebnicové kapitoly korunované citovanými formulacemi snadno (a nadlouho) zafixuje, že setrvačné síly "*reálně existují*", a často o nich pak nesprávně uvažuje i při řešení úloh v inerciálních vztažných soustavách (jde především o "sílu odstředivou" při studiu pohybu hmotného bodu po kružnici ([14.])). K závěru o "reálnosti setrvačných sil" a o jejich "reálných účincích" pravděpodobně dospěje i čtenář, který v encyklopedii nalistuje heslo *"Coriolisova síla"* (tuto sílu zná středoškolák spíše ze zeměpisu než z fyziky):

***Ukázka druhá — encyklopedická* ([24.])**

Coriolisova síla, *zvl. odstředivá síla uplatňující se při relativním pohybu hmotného bodu v nesetrvačné otáčející se soustavě. Složkou celk. zrychlení je zde Coriolisovo zrychlení. C.s. vyvolává např. u pohybujících se těles (při pohledu ve směru pohybu) odchylku doprava na sev. polokouli, doleva na již. polokouli. V přírodě C.s. ovlivňuje např. cirkulaci atmosféry, mořské proudy, toky řek.*

Protože nemá smysl pouštět se do řešení úloh a nemít při tom v otázce setrvačných sil naprosté jasno, uvedeme nejprve věci na pravou míru.

[1] Nebude-li řečeno jinak (například ***Úloha 2.***), budeme vztažnou soustavu spojenou se Zemí i nadále považovat za soustavu inerciální. Tento předpoklad je pro běžné děje, které sledujeme v krátkých časových intervalech, s dobrou přesností splněn.

Důležité:

Při řešení úloh v inerciálních vztažných soustavách se z Newtonových zákonů nejčastěji uplatňuje druhý,

$$m\vec{a} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \ \ldots\ + \vec{F}_{n-1} + \vec{F}_n = \sum_{i=1}^{n} \vec{F}_i = \vec{F}_{\mathrm{v}}\,,$$

v němž $\vec{a}$ označuje zrychlení hmotného bodu (částice) vzhledem k dané vztažné soustavě a $\vec{F}_{\mathrm{v}}$ označuje výslednici sil $\vec{F}_1\,,\ \vec{F}_2\,,\ \ldots\ ,\vec{F}_{n-1}\,,\ \vec{F}_n\,,$ jimiž na sledovaný hmotný bod působí okolní hmotné objekty. Pro síly $\vec{F}_i\,,\ \ 1 \le i \le n\,,$ tzv. *reálné síly*, platí třetí Newtonův zákon — stejně velkými opačně orientovanými silami působí sledovaný hmotný bod na okolní hmotné objekty.

V neinerciálních vztažných soustavách, jak známo, druhý Newtonův zákon neplatí. Protože jde ale o poměrně silný nástroj s celou řadou aplikací, vzdávali bychom se jej jen neradi: naší snahou tedy bude vhodně jej *modifikovat* a "rozšířit" tak jeho platnost i na neinerciální vztažné soustavy. Ukazuje se (viz ***Hlavní text***), že tato modifikace spočívá v zahrnutí *setrvačné* (nebo také *fiktivní*) síly $\vec{F}^*$. Platí

$$m\vec{a}' = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \ \ldots\ + \vec{F}_{n-1} + \vec{F}_n + \vec{F}^* = \sum_{i=1}^{n} \vec{F}_i + \vec{F}^*\,,$$

kde $\vec{a}'$ označuje zrychlení hmotného bodu vzhledem k neinerciální vztažné soustavě. Je nezbytné zdůraznit, že setrvačná síla *nemá* původ ve vzájemné interakci sledovaného hmotného bodu s okolními hmotnými objekty, a proto na ni ve smyslu třetího Newtonova zákona neexistuje reakce. Není tedy ničím jiným než pouze *opravným členem* s fyzikálním rozměrem síly, který umožňuje formálně rozšířit platnost druhého Newtonova zákona i na neinerciální vztažné soustavy a který s ostatními, *reálnými*, silami formálně sčítáme podle obvyklých pravidel pro počítání s vektory.

Na střední škole se zpravidla vystačí s nejjednodušší situací, kdy se neinerciální vztažná soustava vzhledem k inerciální pohybuje translačně (tj. její osy se neotáčejí) se zrychlením $\vec{a}_{\mathrm{t}}$. Potom

$$\vec{F}^* = -m\vec{a}_{\mathrm{t}}\,.$$

Protože se čtenář může setkat i s jinými typy setrvačných sil, například s často zmiňovanou silou Coriolisovou, uvedeme zde pro informaci zcela obecný zápis setrvačné síly (viz např. [3.], [8.], částečně i [10.]), jehož pochopení vyžaduje jistou matematickou pokročilost — znalost vektorového součinu:

$$\vec{F}^* = -m\vec{a}_{\mathrm{t}} - m\left[\vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}\,')\right] - 2m\left(\vec{\omega} \times \vec{v}\,'\right) - m\left(\vec{\varepsilon} \times \vec{r}\,'\right)\,,$$

kde $\vec{r}\,'$ je polohový vektor hmotného bodu v neinerciální vztažné soustavě, $\vec{v}\,'$ je jeho rychlost, $\vec{\omega}$ je úhlová rychlost neinerciální vztažné soustavy vzhledem k soustavě inerciální a $\vec{\varepsilon}$ je odpovídající úhlové zrychlení. Vidíme, že setrvačnou sílu tvoří součet čtyř členů: *translační setrvačné síly*

$$\vec{F}^*_{\mathrm{t}} = -m\vec{a}_{\mathrm{t}}\,,$$

odstředivé setrvačné síly (přívlastek "odstředivá" vyjadřuje směr a orientaci této síly)

$$\vec{F}^*_{\mathrm{o}} = -m\left[\vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}\,')\right]\,,$$

Coriolisovy setrvačné síly

$$\vec{F}^*_{\mathrm{C}} = -2m\left(\vec{\omega} \times \vec{v}\,'\right)$$

a *Eulerovy setrvačné síly*

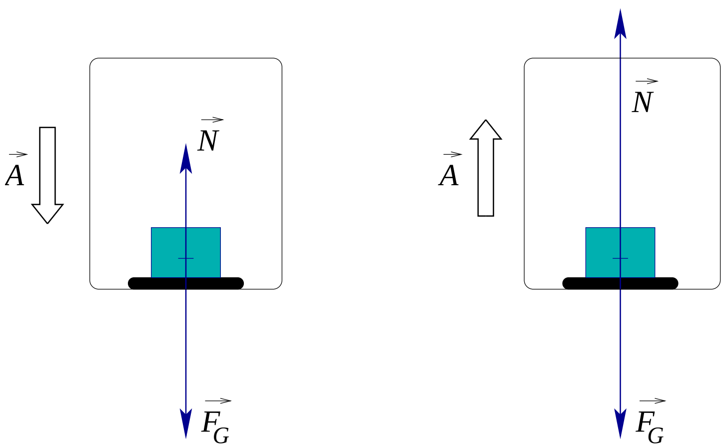
$$\vec{F}^*_{\mathrm{E}} = -m\left(\vec{\varepsilon} \times \vec{r}\,'\right)\,.$$

Po rekapitulaci rozdílu mezi formulací druhého Newtonova zákona v inerciální a v neinerciální vztažné soustavě již můžeme přistoupit k řešení úloh. Uvidíme, že někdy je náročnost řešení z hlediska inerciální i z hlediska neinerciální vztažné soustavy srovnatelná (***Úloha 1.***), jindy je přirozenější řešit úlohu v neinerciální vztažné soustavě (***Úloha 2.***) a konečně existují situace, v nichž je snazší řešit úlohu v inerciální vztažné soustavě a výsledek pak transformovat do dané soustavy neinerciální (***Úloha 3.***)[2].

Úloha 1.:

Na podlaze výtahu leží pružinové váhy cejchované v kilogramech. Jaký údaj ukazují, stoupne-li si na ně pasažér o hmotnosti m a výtah se pohybuje s konstantním zrychlením $\vec{A}$? Úlohu řešte z hlediska pozorovatele stojícího na schodišti (inerciální vztažná soustava) i z hlediska pasažéra jedoucího ve výtahu (neinerciální vztažná soustava). Proveďte diskuzi výsledku v závislosti na orientaci vektoru $\vec{A}$.

Řešení v inerciální vztažné soustavě spojené se Zemí:



Obrázek 1: Silový diagram pro pasažéra — inerciální vztažná soustava

Na pasažéra působí dvě reálné síly: tíhová síla Země $\vec{F}_G$ a tlaková síla podložky (vah) $\vec{N}$ (viz Obrázek 1). Protože se pasažér vzhledem k Zemi pohybuje se stejným zrychlením jako výtah (vazební podmínka $\vec{a} = \vec{A}$), má druhý Newtonův zákon tvar

$$m\vec{A} = \vec{F}_G + \vec{N} \,.$$

Uvážením směru jednotlivých vektorů a silového zákona pro velikost tíhové síly $F_G = mg$ dostáváme

$$\pm mA = mg - N \qquad \Longrightarrow \qquad N = m\left(g \mp A\right) ,$$

přičemž horní z dvojice znamének u velikosti zrychlení odpovídá situaci znázorněné v první části Obrázku 1 (výtah se rozjíždí dolů, nebo brzdí při pohybu vzhůru). Jak již jsme uvedli, tlaková síla podložky (vah) $\vec{N}$ je silou reálnou. Podle třetího Newtonova zákona tedy působí pasažér na váhy silou stejně velkou, ale opačně orientovanou. Váhy pak ukazují údaj $\bar{m}$, pro nějž platí

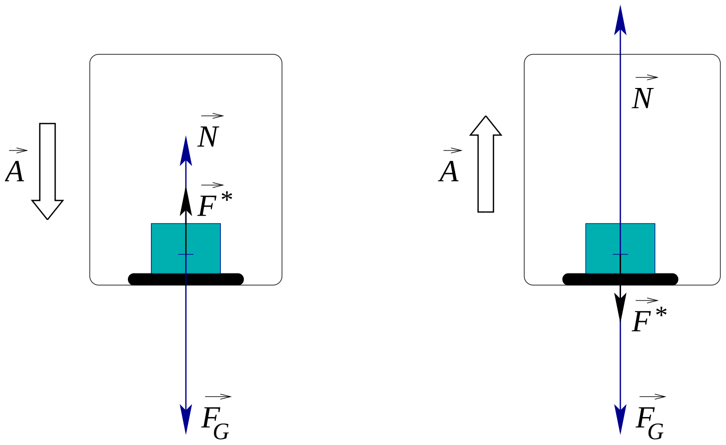
$$N = \bar{m}g \qquad \Longrightarrow \qquad \bar{m} = \frac{N}{g} = m\left(1 \mp \frac{A}{g}\right) .$$

Diskuze výsledku:

Výsledek je ve shodě se zkušenostmi z výtahu: pokud se výtah rozjíždí dolů, nebo brzdí při pohybu vzhůru (viz první část Obrázku 1), je tlaková síla podložky menší než v případě, že se výtah pohybuje rovnoměrně, a váhy tak povzbudivě ukazují menší údaj ($\bar{m} < m$). Pokud se výtah rozjíždí vzhůru, nebo brzdí při pohybu dolů (viz druhá část Obrázku 1), je tlaková síla podložky naopak větší a větší údaj ukazují také váhy ($\bar{m} > m$).

[2] Dodejme, že někteří autoři (např. [4.]) setrvačné síly vůbec nezavádějí a úlohy řeší výhradně v inerciálních vztažných soustavách.

Řešení v neinerciální vztažné soustavě spojené s výtahem:



Obrázek 2: Silový diagram pro pasažéra — neinerciální vztažná soustava (setrvačná síla je nyní zvýrazněna černě)

Na pasažéra opět působí dvě reálné síly: tíhová síla Země $\vec{F}_G$ a tlaková síla podložky (vah) $\vec{N}$. Chceme-li pro něj i nyní zapsat druhý Newtonův zákon, musíme vzít v úvahu opravný člen — setrvačnou sílu $\vec{F}^*$ (viz Obrázek 2). Protože se pasažér vzhledem k výtahu nepohybuje (vazební podmínka $\vec{a}' = \vec{0}$), má druhý Newtonův zákon tvar

$$\vec{0} = \vec{F}_G + \vec{N} + \vec{F}^* \,.$$

Uvážením vztahu $\vec{F}^* = -m\vec{A}$, orientace jednotlivých vektorů a silového zákona pro velikost tíhové síly $F_G = mg$ dostáváme

$$0 = mg - N \mp mA \qquad \Longrightarrow \qquad N = m\,(g \mp A) \ ,$$

přičemž horní z dvojice znamének opět odpovídá situaci znázorněné v první části Obrázku 2. Další postup je již stejný jako při řešení úlohy z hlediska inerciální vztažné soustavy spojené se Zemí. ♢

V souvislosti s předchozí úlohou se přímo nabízí (opět) zdůraznit jednu důležitou skutečnost.

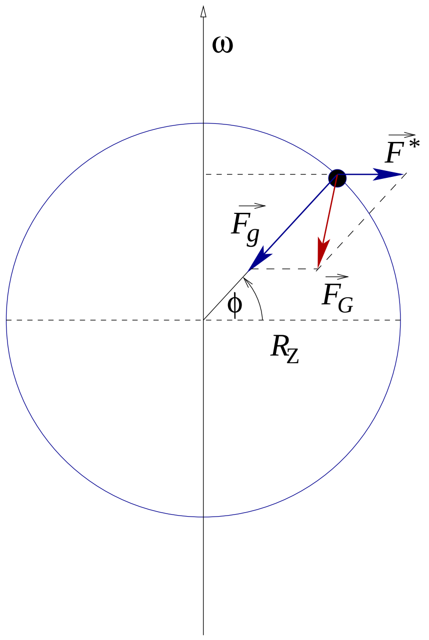
Důležité:

Přemýšleli jste někdy, proč některým lidem bývá špatně v dopravních prostředcích nebo na kolotočích? Odhlédneme-li od rychle se střídajících zrakových vjemů, zbývá jediná příčina: změny tlakových sil $\vec{N}_i$, které působí na jednotlivé orgány. V žádném případě tedy nejde o "projevy setrvačných sil", jak si lidé často myslí: setrvačné síly totiž *nejsou* reálnými silami, ale pouze *opravnými členy* umožňujícími formálně rozšířit platnost druhého Newtonova zákona i na neinerciální vztažné soustavy.

Vraťme se nyní k dynamice křivočarého pohybu — konkrétně k ***Úloze 1.*** a k ***Úloze 2.*** ***Nástrahy čtvrté***. Zatímco k řešení ***Úlohy 1.*** z hlediska neinerciální vztažné soustavy spojené s kuličkou by asi přistoupil málokdo (i když, možné to samozřejmě je, jen je nutné uvědomit si, že setrvačná síla má *obecně nenulovou* jak tečnou, tak normálovou složku), řešení ***Úlohy 2.*** v neinerciální vztažné soustavě lze vídat poměrně často (vyzkoušejte). Zde, s ohledem na důležitost navazující diskuze, zařazujeme poněkud jinou úlohu na pohyb hmotného bodu po kružnici.

Úloha 2.:

Vysvětlete rozdíl mezi gravitační a tíhovou silou. Zemi považujte za homogenní kouli o hmotnosti M_Z a o poloměru R_Z.



Obrázek 3: K definici tíhové síly

Řešení:

Víme již, že vztažná soustava spojená se Zemí je soustavou neinerciální — především proto, že Země se otáčí kolem své osy úhlovou rychlostí, jejíž velikost ω budeme pro jednoduchost považovat za konstantní[3].

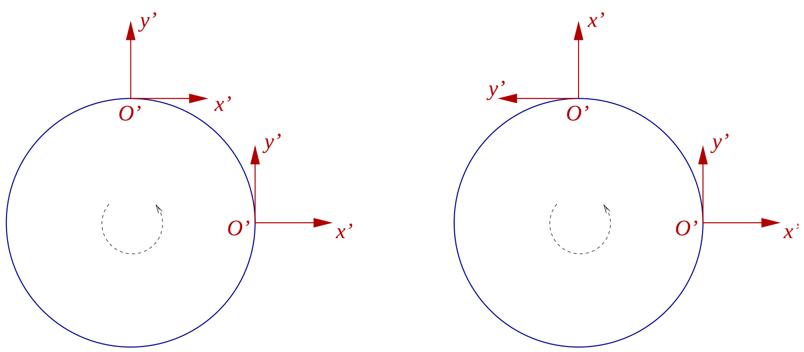
Všimněme si částice o hmotnosti m umístěné na zemském povrchu v místě o zeměpisné šířce ϕ. Tato částice se vzhledem k inerciální vztažné soustavě, která se spolu se Zemí pohybuje kolem Slunce, ale neotáčí se, pohybuje rovnoměrně po kružnici o poloměru $R_Z \cos\phi$ (viz Obrázek 3). Počátek neinerciální vztažné soustavy ztotožněný s naší částicí se tedy vzhledem k uvažované inerciální vztažné soustavě pohybuje s dostředivým zrychlením. Při formulaci druhého Newtonova zákona pro částici je proto nutné kromě gravitační síly o velikosti $F_g = -\kappa \frac{mM_Z}{R_Z^2}$ směřující do středu Země a eventuálně jiných reálných sil uvážit již známý opravný člen — sílu *setrvačnou (odstředivou)* $\vec{F}^*$ o velikosti $F^* = m\omega^2 R_Z \cos\phi$. Výslednici gravitační síly a síly setrvačné (odstředivé) nazýváme *tíhovou silou* (na Obrázku 3 je vyznačena červeně), tj.

$$\vec{F}_G = \vec{F}_g + \vec{F}^* \,.$$

Zrychlení $\vec{g} = \frac{\vec{F}_G}{m}$, které tato síla udílí částici o hmotnosti m, nazýváme *tíhovým zrychlením.*

Diskuze výsledku:

Ze vztahů, které jsme uvedli v průběhu řešení, je zřejmé, že pozemský pozorovatel není schopen experimentálně rozlišit gravitační působení od "působení" setrvačné (odstředívé) síly: zaznamenává a měří pouze jejich výslednici — sílu tíhovou. Tato síla se mění se zeměpisnou šířkou, nejmenší je na rovníku a největší je na pólech. Vidíme tedy, že formulace "na těleso působí Země tíhovou silou" je do jisté míry vnitřně rozporuplná. Orientovaný čtenář však nyní jistě ví, jak jí rozumět.



Obrázek 4: Zavedení vztažné soustavy spojené částicí (pohled proti směru zemské osy)

Poznámka:

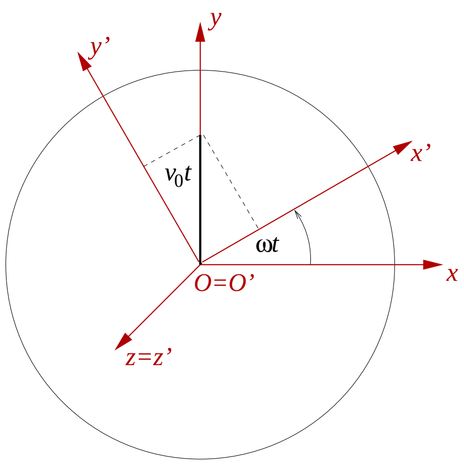
Pozorný čtenář jistě postřehl nedůslednost, s níž jsme zavedli vztažnou soustavu spojenou s částicí: určili jsme její počátek O', ale nic jsme neřekli o směru jejích os x', y' a z'. Jistě si lze představit přinejmenším dvě různé situace (viz Obrázek 4: v jeho první části se "čárkované" osy vzhledem k výše zavedené inerciální soustavě neotáčejí, ve druhé části je "čárkovaná" soustava souřadnic pevně spo-

[3]Skutečnost, že střed Země se pohybuje kolem Slunce po zakřivené trajektorii, v prvním přiblížení neuvažujeme.

jená se Zemí). Projeví se tato nejednoznačnost při řešení úlohy? Určitě ne — stačí si připomenout obecný vztah pro setrvačnou sílu uvedený na str. 2: Počátek jakékoli vztažné soustavy spojené s částicí umístěnou na zemském povrchu se pohybuje s translačním zrychlením, které je zrychlením dostředivým, tj. $\vec{a}_\mathrm{t} = \vec{a}_\mathrm{d}$. Odpovídající setrvačná (translační) síla $\vec{F}^* = \vec{F}^*_\mathrm{t} = -m\vec{a}_\mathrm{d}$ se zde vzhledem ke své orientaci doplňuje přívlastkem "odstředívá", jde však o jinou sílu než $\vec{F}^*_\mathrm{o} = -m\left[\vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}\,')\right]$, která je nulová, neboť částice je v počátku soustavy souřadnic v klidu ($\vec{r}\,' = \vec{0}$). Ze stejného důvodu je nulová i setrvačná síla Coriolisova a setrvačná síla Eulerova.

Jinak tomu bude v případě, že se částice vzhledem k neinerciální vztažné soustavě *pohybuje* (čtenář jistě slyšel o tzv. Foucaultově kyvadle, jehož rovina kmitů se díky rotaci Země stáčí). Nalezení trajektorie částice v rotující vztažné soustavě je však v plné obecnosti poměrně komplikovanou záležitostí, která přesahuje rámec tohoto textu. V následující ***Úloze 3.*** popíšeme alespoň jednu z nejjednodušších situací ([15.]). ♢

Úloha 3.:
Na vodorovné točně, která se otáčí konstantní úhlovou rychlostí o velikosti ω, se pohybuje částice o hmotnosti m. Předpokládejme, že v okamžiku $t = 0$ se částice nachází ve středu točny a její rychlost je $\vec{v}_0$. Ve vhodně zvolené soustavě souřadnic nalezněte závislost polohového vektoru částice jak vzhledem k Zemi, tak vzhledem k točně. Tření i odpor vzduchu zanedbejte.



Obrázek 5: Pohyb částice na točně

Řešení v inerciální vztažné soustavě spojené se Zemí:
Na částici působí dvě reálné síly: tíhová síla Země $\vec{F}_G$ a tlaková síla podložky $\vec{N}$. Druhý Newtonův zákon má tedy tvar

$$m\vec{a} = \vec{F}_G + \vec{N}\,.$$

Zvolme soustavu souřadnic $Oxyz$ spojenou se Zemí tak, že její počátek je ztotožněn se středem točny, osa y má stejnou orientaci jako vektor rychlosti částice $\vec{v}_0$ v okamžiku $t = 0$ a osa z směřuje vzhůru (viz Obrázek 5). Složky jednotlivých vektorů jsou, s uvážením vazební podmínky, že částice se pohybuje pouze ve vodorovné rovině,

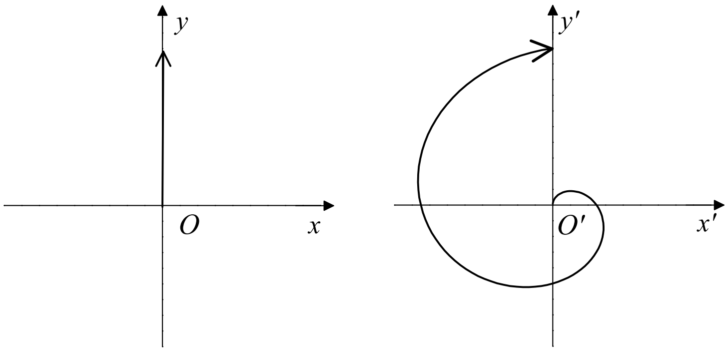
$$\vec{F}_G = (0, 0, -F_G)\ , \qquad \vec{N} = (0, 0, N)\ , \qquad \vec{a} = (a_x, a_y, 0)\ .$$

Z druhého Newtonova zákona zapsaného ve složkách

$$\begin{array}{lrcl} x: & ma_x & = & 0\,, \\ y: & ma_y & = & 0\,, \\ z: & 0 & = & F_G - N \end{array}$$

vychází $\vec{a} = (0, 0, 0) = \vec{0}$, což znamená, že částice se vzhledem k Zemi pohybuje rovnoměrně přímočaře. Její trajektorií je ve zvolené soustavě souřadnic kladná poloosa y (viz Obrázek 6), tj.

$$\vec{r}\,(t) = (0, v_0 t, 0)\ .$$



Obrázek 6: Trajektorie částice vzhledem k Zemi a vzhledem k točně

Řešení v neinerciální vztažné soustavě spojené s točnou: Nalezení trajektorie částice vzhledem k točně užitím druhého Newtonova zákona formulovaného v neinerciální vztažné soustavě (str. 2) je nyní komplikované už tím, že vyžaduje dovednost řešit diferenciální rovnice druhého řádu. Toto úskalí lze snadno obejít: zvolíme-li soustavu souřadnic $O'x'y'z'$ spojenou s točnou tak, že v okamžiku $t = 0$ splývá se soustavou $Oxyz$, platí pro polohový vektor částice (viz Obrázek 5, Obrázek 6)

$$\vec{r}\,'(t) = (v_0 t \sin \omega t, v_0 t \cos \omega t, 0) \ . \qquad \diamondsuit$$

Otázky, cvičení a náměty k přemýšlení:

1. Vraťte se k ***Ukázkám*** na str. 1 a přeformulujte je tak, aby jasně a stručně vystihovaly podstatu setrvačných sil.
2. S jakým zrychlením se pohybuje výtah, jehož pasažér je ve stavu beztíže? Jaký údaj v tomto případě ukazují pružinové váhy, na nichž pasažér stojí?
3. Vraťte se k ***Úlohám 1., 3., 4.*** a ***5.*** z ***Nástrahy čtvrté*** (str. 5. a 6.) a vyřešte je jak z hlediska inerciální vztažné soustavy spojené se Zemí, tak z hlediska neinerciální vztažné soustavy spojené s kuličkou.
4. Vlak se rozjíždí po přímé vodorovné trati s konstantním zrychlením $\vec{A}$. Na podlaze jednoho z vagónů leží bedna o hmotnosti m. Jakou podmínku musí splňovat velikost zrychlení vlaku, aby bedna zůstala vzhledem k vagónu v klidu, je-li koeficient statického tření mezi bednou a podlahou f_0? Úlohu řešte z hlediska pozorovatele stojícího na nástupišti (inerciální vztažná soustava) i z hlediska cestujícího ve vlaku (neinerciální vztažná soustava).
5. S jakým zrychlením se pohybuje bedna vzhledem k vagónu a vzhledem k nástupišti, nesplňuje-li velikost zrychlení vlaku podmínku odvozenou v předchozí úloze? Koeficient dynamického tření mezi bednou a podložkou je f, odpor vzduchu zanedbejte.
6. Popište rovnovážnou polohu kuličky zavěšené na niti délky l na stropě vagónu, který projíždí rychlostí o konstantní velikosti v_0 zatáčkou o poloměru R. Úlohu řešte z hlediska pozorovatele stojícího na nástupišti (inerciální vztažná soustava) i z hlediska cestujícího ve vlaku (neinerciální vztažná soustava).
7. Po nakloněné rovině s úhlem sklonu α umístěné ve výtahu, který jede s konstantním zrychlením $\vec{A}$, se pohybuje kostka o hmotnosti m. Určete její zrychlení vzhledem k výtahu. Koeficient dynamického tření mezi kostkou a nakloněnou rovinou je f, odpor vzduchu zanedbejte.

8. Porovnejte subjektivní pocity pasažéra
   (a) při rychlém a při pomalém průjezdu vozíčku horské dráhy ostrou zatáčkou ležící ve vodorovné rovině,
   (b) při rychlém a při pomalém průjezdu vozíčku nejvyšším bodem "spirály smrti" (smyčky tvaru kružnice ležící ve svislé rovině).

   Které síly tvoří v jednotlivých případech sílu dostředivou? Kdy je nutné pasažéra pevně připoutat k sedadlu? Proč?

9. Kolotoč "Lochnesku" tvoří kruhový disk o poloměru R, v jehož středu je umístěn basketbalový koš a na obvodu jsou rozmístěny sedačky pro hráče. Hráč dokáže hodit míč rychlostí o velikosti v_0.
   (a) Jak musí hráč mířit, aby zasáhl koš, je-li kolotoč v klidu?
   (b) Jak musí hráč mířit, aby zasáhl koš, otáčí-li se kolotoč konstantní úhlovou rychlostí o velikosti ω? Jakou podmínku musí splňovat zadané veličiny, aby hráč skutečně mohl koš zasáhnout?

   Předpokládejte, že rovina kolotoče je vodorovná a odpor vzduchu je zanedbatelný.

****

Příbuzné texty:

- ▷ ***Hlavní text***
- ▷ ***Nástraha první***
  Není pohyb jako pohyb aneb Kinematika jako zahřívací předkolo
- ▷ ***Nástraha druhá***
  Vektory, průměty, složky, velikosti, ... aneb Jak se vypořádat s řešením úloh?
- ▷ ***Nástraha třetí***
  Rozumíme silám tření? aneb K čemu slouží vazební podmínky?
- ▷ ***Nástraha čtvrtá***
  Dynamika křivočarého pohybu aneb Jak se vyhnout tradičním omylům?
- ▷ ***Nástraha šestá***
  Když se sejde více částic aneb Mechanika tuhého tělesa
- ▷ ***Nástraha sedmá***
  Zákony zachování aneb "Není nutné vědět o všem..."
- ▷ ***Nástraha osmá***
  Vody stojaté i tekoucí aneb Mechanika kapalin
- ▷ ***Nástraha devátá***
  Když Newtonovy zákony nestačí aneb Termodynamika a statistická fyzika v kostce
- ▷ ***Nástraha desátá — bonusová***
  Příliš těžké ??? aneb Několik úloh "s hvězdičkou"