

S větrem o závod

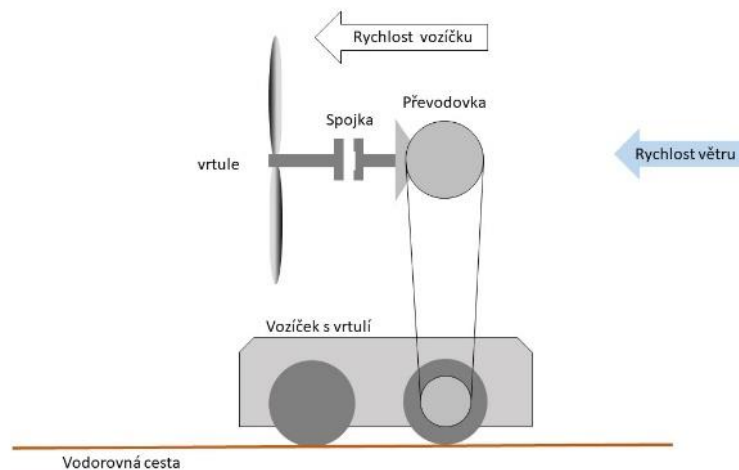
Pavel Konečný

Oddělení didaktiky fyziky ÚFE PŘF MU

Abstrakt

Je možné, aby vozíček bez motoru s větrem v zádech jel po rovině rychleji, než vítr fouká? Ano je. Tento problém není nijak nový a kompletní experimentální i teoretické vysvětlení lze nalézt v řadě pramenů, názorně např. [1]. V následujícím textu je popsán experiment, který by měl být proveditelný v interiéru a přispět k pochopení, proč to je možné.

Úvod



Obr. 1. vozíček s vrtulí.

Předpokládejme, že máme vozíček bez motoru s vrtulí s osou ve směru jízdy, která je převody spojena s koly vozíčku viz obr. 1. Předpokládejme, že převod a vrtule má realisticky dosažitelnou účinnost a převodový poměr a stoupání vrtule jsou nastavitelné tak, aby v každém jízdním režimu byla hnací síla maximální. Může jet vozíček po rovině s větrem v zádech trvale rychleji než vítr, aniž by ho poháněl motor nebo jel s kopce?

Odpověď je kladná. Problém to není nový a už je dávno vyřešen. Názorně vysvětleno včetně experimentu je to například na videu [1] a už k tomu v podstatě nejde nic přidat.

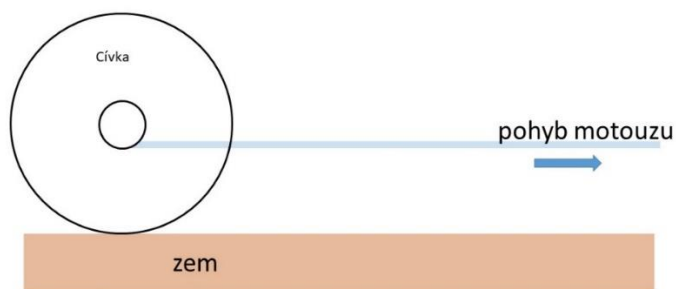
Autor tohoto článku se ale opakovaně setkává s tím, že fakt, že to jde a zdůvodnění proč, bývá často odmítáno, a to i osobami s určitou fyzikální erudicí. Je otázka, proč tak v zásadě jednoduchý problém, vozíček se pohybuje horizontálně rovnoměrně přímočaře, vítr fouká ve stejném směru konstantní rychlostí, činí takové potíže. Najít na to odpověď by mohlo být užitečné pro didaktiku fyziky. Tento úkol vyžaduje erudovaného didaktika a pravděpodobně i psychologa.

Cílem práce bylo připravit technicky přístupné pokusy. Vyrovnat se po technické stránce tomu, co je prezentováno na videu [1], kde se experimentuje „ve skutečné velikosti“ s vozíkem s lidskou posádkou, dost dobře nejde. Byl by k tomu potřeba aerodynamický tunel s pohyblivým pásem pro jízdu vozíčku, a to už je experiment jiné úrovně.

Příbuzné experimenty

Cívka s nití.

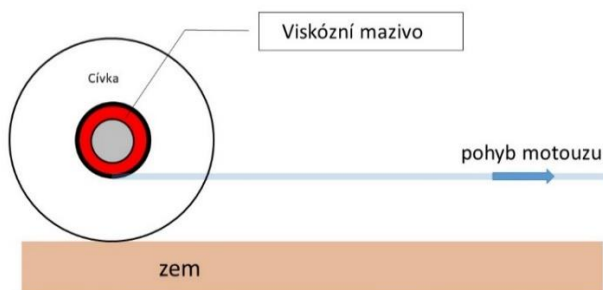
Existuje jeden běžný školní pokus s cívkou, na jejímž středu je namotán motouz a sleduje se, kterým směrem se cívka po rovině kutálí v závislosti na úhlu, pod kterým za motouz táhneme. Pokud táhneme za motouz horizontálně podle obr. 2., cívka se pohybuje ve směru tahu motouzu a i bez experimentu nebo výpočtů je z názoru zřejmé, že se bude pohybovat tak, že se na ni bude motouz navíjet. To znamená, že se pohybuje rychleji než motouz. Když bychom považovali motouz za „vitr“, není to analogie našeho pokusu s vozíčkem ve větru?



Cívka se odvaluje po zemi (prostředí 1) a je tažena motouzkem (prostředí 2)

Obr. 2.

Úplně není, protože vrtule se ve vzduchu nešroubuje jak matice po závitové hřídeli, ale „prokluzuje“. K bližší analogii by bylo potřeba pokus modifikovat tak, že se středový váleček, na který se motouz navíjí, vůči cívce protáčí s vhodným (třeba viskózním) třením, viz obr. 3.



Cívka se odvaluje po zemi (prostředí 1) a je tažena motouzkem (prostředí 2)

Obr. 3.

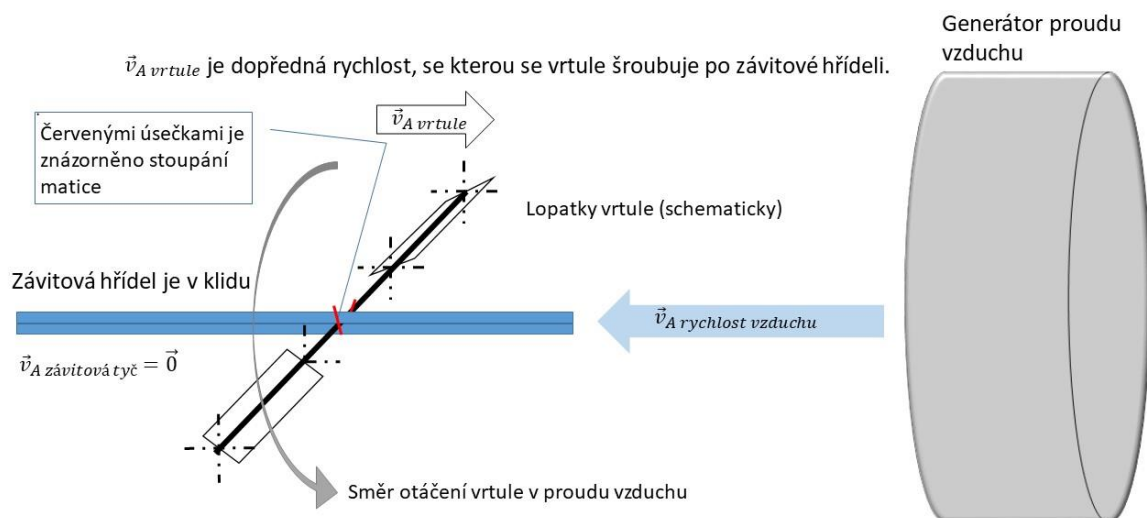
V tomto případě už nepojede cívka rychleji než motouz automaticky, ale jedině při splnění určitých podmínek.

Výsledkem uvedených experimentů není podle zkušenosti autora nikdo příliš překvapen a nevnímá je jako paradoxy. Přitom je to dost podobný jev, jako případ vozíčku s větrem v zádech.

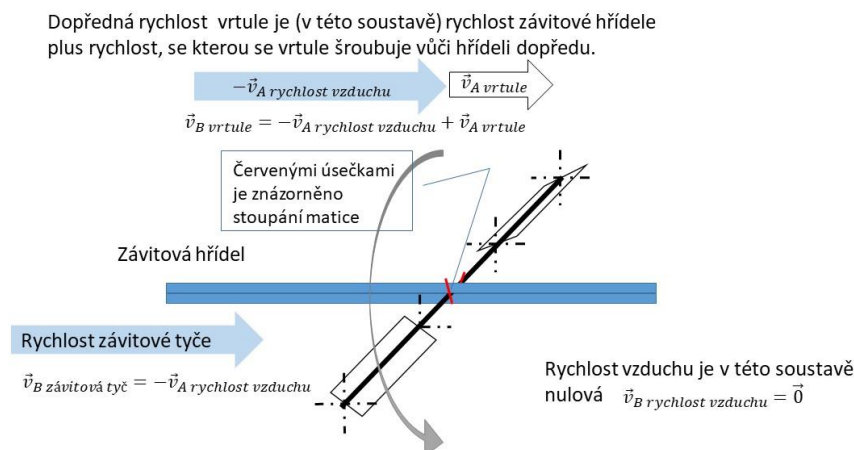
Vrtule na závitové tyči.

Že se vrtule s maticí na závitové hřídeli může šroubovat proti větru, je experimentálně snadno ověřitelné a rovněž intuitivně přijatelné. Vrtule v proudu vzduchu funguje jako větrná turbína a získaný výkon při dostatečně malém stoupání a tření může být dostačující k tomu, aby se vrtule po závitové tyči pohybovala proti větru.

Pozorujme tuto situaci ze dvou vztažných soustav. Se soustavy A spojené se závitovou tyčí obr. 4 a se soustavy B spojené s nabíhajícím proudem vzduchu obr. 5. Vyznačené rychlosti jsou indexovány A nebo B.



Obr. 4. Pozorováno ze vztažné soustavy A spojené se závitovou hřídelí

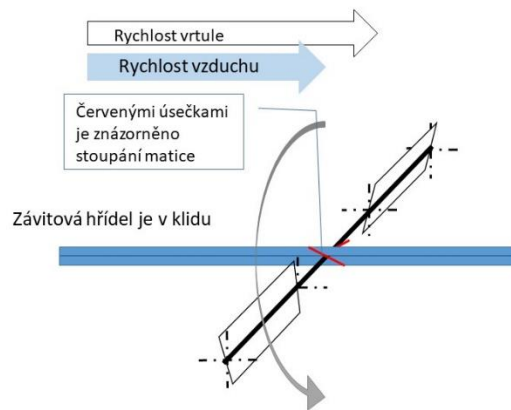


Obr. 5 Pozorováno ze vztažné soustavy B spojené se vzduchem

V soustavě B, tedy v soustavě spojené se vzduchem, je to závitová hřídel, co žene vrtuli vzduchem. Protože se jedná o tutéž situaci, vrtule se šroubuje po závitové hřídeli dopředu, je výsledná rychlost vrtule větší, než to, co ji posunuje, tedy ta závitová hřídel. V tomto smyslu jsme svědky situaci analogické cívice tažené motouzem, viz obr. 3, obr. 4.

Přeznačení vzduch za závitovou hřídel a závitovou hřídel za vzduch

V principu je pohyb matice po závitové hřídeli podobný šroubování vrtule vzduchem (s tím rozdílem, že vzduch není rigidní, takže šroubování se děje s nějakým prokluzem). Provedme následující myšlenkový experiment. Zkusme „proměnit“ vzduch na „závitovou hřídel“ a závitovou hřídel za „vzduch“. V předchozím případě byl děj pozorován ze soustavy spojené se vzduchem, který se v našem myšlenkovém experimentu proměnil v „závitovou hřídel“, takže vztažná soustava bude teď spojena se „závitovou hřídelí“ (dříve vzduchem). Viz obr. 6. Ještě zapotřebí upravit (zmenšit) stoupání vrtule, protože ta po transformaci hraje roli matice, a naopak zvětšit stoupání matice, protože ta je teď v roli vrtule. Konkrétní hodnoty by vyplynuly z výpočtu, který by zahrnoval aerodynamické parametry vrtule, tření atd.

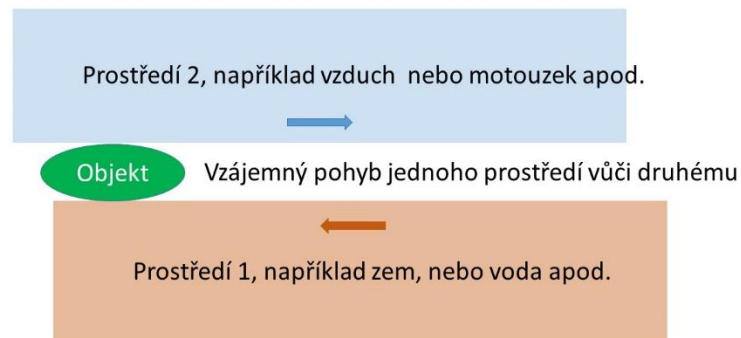


Obr. 6

Po této transformaci máme přesně tu situaci, na jejíž principiální možnost se ptáme. Tedy vrtule jede dopředu rychleji, než jí fouká vítr „do zad“. Vidíme tedy, že minimálně principiálně to možné je. Ale experiment podle obr. 6 je jenom myšlenkovým experimentem. Z řady důvodů je obtížně prakticky proveditelný a hlavně pozorovatelný. Jak bychom poznali, že se vrtule pohybuje rychleji než vítr, který se do ní zezadu opírá?

Zobecnění

Z předchozích příkladů vidíme, že v obecnosti máme situaci podle obr. 7



Obr. 7.

Vozíček s vrtulí

Aby bylo možné na položenou otázku odpovědět technicky jednoduchým pokusem, je potřeba zvolit vztažnou soustavu spojenou s klidným vzduchem v místnosti, tj. s místností, kde nefouká. Aby bylo možné uskutečnit ustálený stav, musí se vozíček pohybovat po otáčející se točně jako kolotoč. Alternativou by byl běžící pás, což je technicky obtížněji realizovatelné. Zvolme osu otáčení z . Úhlové rychlosti točny a vozíčku mají směr osy z ,

momenty sil působící na vozíček jsou rovněž vztahovány k ose z . Vektory rychlostí mají nenulovou složku pouze \vec{e}_φ (v cylindrické soustavě s osou z). Všechny symboly pro rychlosti a vektorové veličiny mající směr \vec{e}_φ budou v dalším textu bez indexů a rozumí se jimi složka ve výše zavedeném souřadnicovém systému.

V této soustavě platí, čím větší rychlost větru, tím rychleji se musí točna otáčet úhlovou rychlostí ω . Rychlost větru je

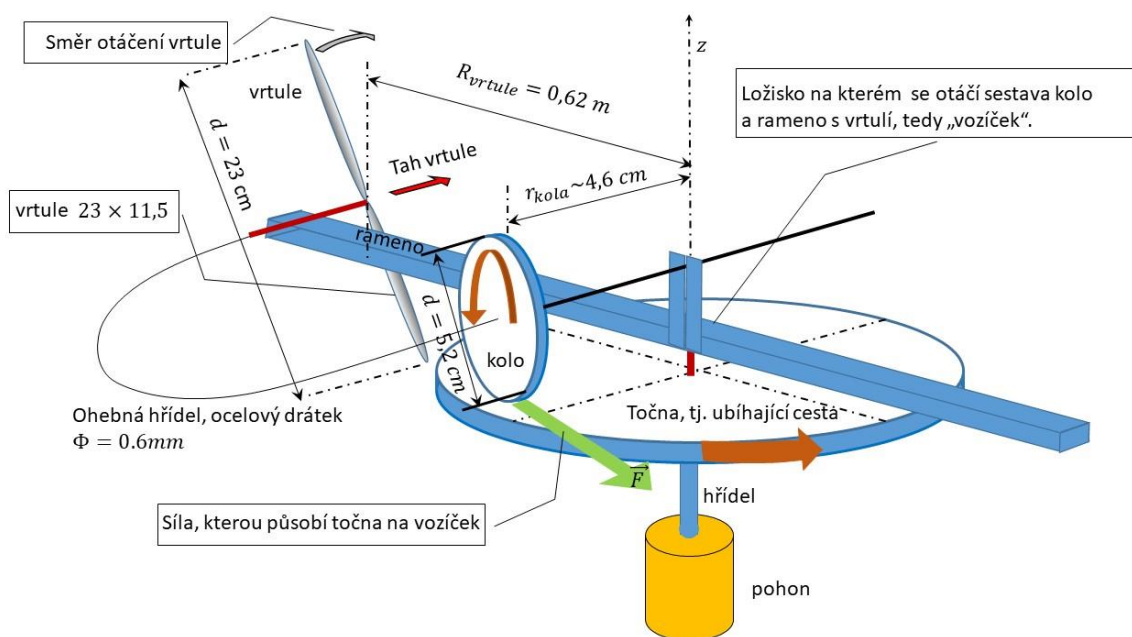
$$v = -\omega R$$

Kde R , je délka ramene, na kterém je umístěna vrtule.

Rychlost vozíčku na poloměru umístění vrtule R **vůči točně** označme V

Ve vzdálenosti r od osy otáčení se po točně odvaluje kolečko vozíčku o průměru d . Kolečko pohání vrtuli ohebným hřídelem, viz obr. 8. Kolečko nejde umístit na poloměru R , protože točna by byla příliš velká. Mezi rychlostí jízdy vozíčku V a otáčkami n vrtule platí vztah

$$n = V \frac{r}{R} * \frac{1}{\pi d}$$



Obr. 8

Experiment

Vhodným zařízením (dobře regulovatelná vrtačka) uvedeme točnu do ustálené rotace a ručně urychlíme vozíček tak, aby se pohyboval spolu s točnou. To odpovídá startovací situaci, kdy vozíček stojí ve větru vůči cestě nehybně, vrtule se neotáčí. Na vozíček a zejména na vrtuli na delším rameni působí aerodynamický odpor vzduchu. Vzhledem k soustavě spojené s točnou máme vozíček s větrem v zádech, který ho vůči točně urychluje jako vítr plachetnici. To ovšem znamená, že se kolo vozíčku začne po točně odvalovat a přes ohebný hřídel roztáčet vrtuli. Pokud je všechno dobře nastaveno, vrtule

táhne vozíček ve směru větru. Proti tomu v opačném směru působí na vozíček síly od rotující točny. Jsou to síly spojené s třením a hlavně síla \vec{F} vznikající tím, že z odvalujícího se kolečka je získáván výkon P k pohonu vrtule.

$$P = \text{účinnost} * |V| * F$$

V je rychlost vozíčku vůči točně. Vůči soustavě spojené se vzduchem (tj. místnosti) se vozíček s rostoucím tahem vrtule zpomaluje, tj. ve vztažné soustavě spojené s točnou se jeho rychlost blíží rychlosti větru

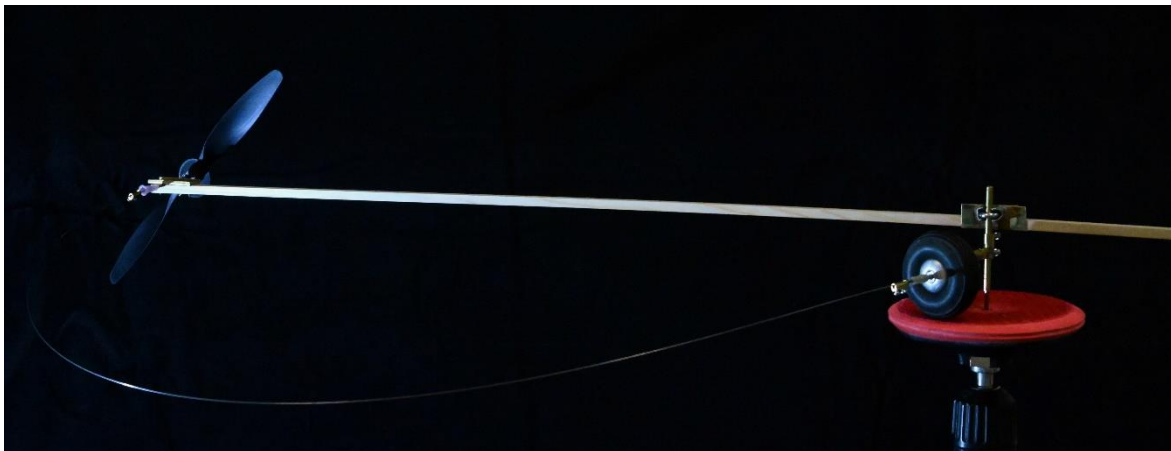
$$V = -\omega R$$

Při vhodných převodových poměrech rychlosti a aerodynamických parametrech vrtule budou existovat takové otáčky točny ω (tj. rychlost větru v), kdy vozíček bude vůči místnosti stát. To znamená, že jede rychlostí větru.

V této situaci je součet momentu sil statického tahu vrtule a momentu sil, kterými působí rotující točna na vozíček vzhledem k ose z nulový.

Momenty sil, kterými působí rotující točna na vozíček, jsou jednak síly třecí, jednak síla související s tím, že výkon pro pohon vrtule vzniká odvalováním kolečka po točně. Pro stejný výkon P bude tato síla tím menší, čím větší bude rychlost V .

Z toho plyne, že dalším malým zvýšením rychlosti otáčení točny ω (zvýšení rychlosti větru v) se sníží síla \vec{F} a vozíček se může začít pohybovat vůči posluchárně opačně, než se točí točna (což je ekvivalentní tomu, že pojedou rychleji, než vítr fouká).



Vozíček s vrtulí

Technická poznámka

Popsaná situace nastane jen při vhodných mechanických a aerodynamických poměrech. Naštěstí je délkou R ramene možno systém doladit v širokém rozsahu. Čím větší bude R , tím menší bude výkon potřebný k dané hodnotě statického momentu tahu vrtule. Tedy pravidlo zní: když to nefunguje, prodlužte rameno R . Zařízení bylo vyzkoušeno se dvěma dost různými modelářskými vrtulemi pro gumový pohon. S oběma vrtulemi to fungovalo na první pokus. Zařízení nemusí fungovat pro žádné R při mimořádně strmém nárůstu třecích sil s rychlostí V .

Závěr

K popsanému problému existuje analogický, velmi jednoduchý experiment s cívkou taženou motouzem, popřípadě v úpravě s prokluzujícím středem.

Experiment s vozíčkem a vrtulí je možné uskutečnit v místnosti, pokud vhodně vybereme vztažnou soustavu. Snadněji se uvede do pohybu cesta, po které se má vozíček pohybovat, než vzduch a také se z této soustavy lépe pozoruje, co jede rychleji.

Návod jak uvažovat o tomto problému

1. Zkusme přejít k jiné inerciální soustavě, může to usnadnit pochopení situace.
2. Nenechme se příliš ovlivnit sugestivním zadáním. To, co po čem jede, je v tomto konkrétním případě relativní.
3. Hledejme analogické situace, může se ukázat, že problém je už v jiné podobné situaci vyřešen.

Poznámka na závěr

Experiment i argumentace je pojata kvůli přehlednosti a hlavně jednoduchosti kvalitativně. Tedy jestli to může fungovat v principu, nikoliv jak to udělat, aby se to v definovaných podmínkách chovalo kvantitativně určeným způsobem.

Literatura

[1] [Risking My Life To Settle A Physics Debate - YouTube](#) dostupné on line

<https://www.youtube.com/watch?v=jyQwgBAaBag&t=77s>