

Úloha I.P ... nejúčinnější pohon

10 bodů; průměr 8,67; řešilo 52 studentů

Najděte nejúčinnější pohon osobního automobilu. Přesněji, nalezněte takový pohon, který má na 1 J vykonané práce motorem co nejmenší spotřebu energie, a to od začátku výroby paliva až po účinnost samotného motoru. Můžete porovnávat např. benzín, naftu, elektrinu, vodík nebo krmení pro zapřaženého koně.

Jarda chtěl ten filodendron doručit účinně.

Autorem řešení je řešitel Daniel Švec.

Úvod

Za pohon považujeme takové ústrojí, u kterého je možné podobné masové rozšíření, jako u dnešních konvenčních motorů.

Kůň (zvířata)

Nebudeme brát v potaz přidanou hodnotu, kterou s sebou chov zvířat přináší. Pro ušetření úvah o bazálním metabolismu a efektivitě trávicího traktu koně rovnou zohledníme jeho přibližný denní příjem potravy a vykonanou práci. Z dohledaných zdrojů plyne, že zdravý dospělý kůň vykonávající těžkou práci musí mít příjem potravy dosahující až 4 % jeho hmotnosti. Vzhledem k nutnosti tažení kočáru lze předpokládat, že nevhodnější budou ta nejsilnější plemena, u nichž nebude zapotřebí takového množství jedinců. K nim by měl náležet např. Clydesdale, Skirský, Percheron či Belgický. U těchto plemen se průměrná hmotnost m_k pohybuje v rozmezí 900 – 1200 kg. Budeme-li do domácnosti (odhad na 4-člennou rodinu) uvažovat jeden kočár tažený dvojspřežím, přičemž se koně budou střídat ve dvou směnech, dostaneme nutný počet koní rovný počtu lidí N , tedy cca $8 \cdot 10^9$. Sklizeň nutná pro nasycení koní tedy musí vynést

$$m = \frac{4}{100} m_k t N = \frac{4}{100} \cdot 1200 \cdot 365,25 \cdot 8 \cdot 10^9 \text{ kg} \doteq 1,4 \cdot 10^{14} \text{ kg},$$

Uvážíme-li, že pšenice se za rok v ČR vypěstuje $5,5 \cdot 10^9$ kg, by bylo nutné celosvětově zvýšit produkci pšenice o pětadvaceti tisícinásobek produkce ČR. S tím souvisejí další přidružené náklady na pěstování, které navíc není možné kdekoliv na světě realizovat kvůli nevhodným podmínkám. Kromě samotné péče o krmivo je třeba uvažovat i jeho hnojení a postřiky. V neposlední řadě nelze vyloučit, že markantní nárůst spotřeby obilovin se může projevit v nedostatku potravy pro lidi, což se může odrazit v cenách potravin. Koně též vyžadují určitou veterinární péči a je pravděpodobné, že po většinu času by nemohli být plně využiti – kvůli spánku i nutnosti odpočinku, jež stroje nevyžadují. Z těchto úvah plyne, že zvířata nelze považovat jak za spolehlivý, tak za nejúčinnější pohon. Lidé ovšem neprahnou po pohonu nejúčinnějším, ale pohonu dostatečném. Sebespořivější imaginární zvíře s nereálnou účinností 100 % je nepoužitelné, dokáže-li za den vykonat práci 1 J.

Benzín

Benzín se, stejně jako nafta, získává z ropy. Tu je primárně nutné vytěžit pomocí vrtů, kde se však nejprve musí odstranit samotná hornina. Ropa pak buď vytéká sama, či se musí vytěžit – jelikož zde zanedbáme uvažované účinnosti použité techniky, budeme zde uvažovat těžbu ropy namísto jejího energeticky značně méně náročného autonomního vyvěrání. Dále odhadneme hustotu ropy na $\rho_2 = 1 \text{ kg} \cdot \text{dm}^{-3}$ (zprůměrováno z $0,8 - 1,2 \text{ kg} \cdot \text{dm}^{-3}$), hustotu hornin na $\rho_1 = 5500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (hustota Země), vrt jakožto válec s poloměrem $r = 1 \text{ m}$ a výškou $100 - 10000 \text{ m}$,

tedy průměrně přibližně $h = 4\,000$ m. Celkem na jedno ložisko použijeme $N = 6$ vrtů, přičemž to obsahuje kromě plynu (který nyní neuvažujeme) odhadem $V_r = 150\,000$ barelů (1 barel = 159 l) ropy. Také je třeba si uvědomit, že na energie i suroviny je náročná i výroba motoru či samotného automobilu. Pro zjednodušení tyto náklady začleníme do náročnosti těžby jakožto polovinu energie/práce nutné k vytěžení horniny (nikoli ropy). Co se týče těžby horniny, uvědomíme si, že v průměru se musí vyzdvihnout o $h/2$, neboť první má výšku 0 a poslední díl naopak plnou hloubku h :

$$\begin{aligned} W_1 &= Nm \frac{h}{2} g = N \rho_1 V g \frac{h}{2}, \\ &= N \rho_1 \pi r^2 h g \frac{h}{2}, \\ &= 3 \pi \rho_1 g r^2 h^2. \end{aligned}$$

Pro těžbu ropy budeme uvažovat, že se její zásoby nacházejí v přibližně stejné hloubce (výše značené jako h), která je (mezi dnem a hladinou ropy) zanedbatelná oproti výšce válce, kterým je těžena:

$$W_2 = mgh = \rho_2 V_r g h.$$

Pro práci na výrobu motoru i samotného automobilu platí

$$W_3 = \frac{1}{2} W_1.$$

Celkem je tak potřeba

$$\begin{aligned} \sum W &= W_1 + W_2 + W_3, \\ &= W_1 + W_2 + \frac{1}{2} W_1, \\ &= \frac{3}{2} \cdot 3 \pi \rho_1 g r^2 h^2 + \rho_2 V_r g h, \\ &= \frac{9}{2} \pi \cdot 5\,500 \cdot 9,81 \cdot 1^2 \cdot 4\,000^2 + 1 \cdot 150\,000 \cdot 159 \cdot 9,81 \cdot 4\,000 \text{ J} \doteq 1,3 \cdot 10^{13} \text{ J}. \end{aligned}$$

Na 1 l tak připadá

$$1 \text{ l} = \frac{1,3 \cdot 10^{13} \text{ J}}{150\,000 \cdot 159} \doteq 550 \text{ kJ}.$$

Víme, že spotřeba automobilu s motorem na benzín či naftu činí průměrně $8 \text{ l} - 10 \text{ l}$ na 100 km . My využijeme vyšší hodnotu. Osobní automobil se pohybuje na kolech, přičemž největší kola, kterými se dají některé vozy osadit mají poloměr okolo $r = 30 \text{ cm}$, musíme tedy uvažovat valivý odpor (pro kolo na asfaltu $\xi = 0,5 \text{ mm}$):

$$\begin{aligned} rF &= \xi F_G \quad \Rightarrow \quad F = mg \frac{\xi}{r}, \\ W &= Fs = 1 \text{ J} \quad \Rightarrow \quad s = \frac{Wr}{mg\xi}. \end{aligned}$$

Spotřeba paliva je přímo úměrná dráze s

$$\text{Sp} = ks = \frac{kWr}{mg\xi}.$$

kde k značí, kolik litrů benzínu auto spotřebuje na 100 km. Se započtením účinnosti motoru ($\eta = 20 - 40 \% \rightarrow 35 \%$)

$$\begin{aligned} \text{Sp}' &= \frac{k}{\eta}, \\ s &= \frac{k}{m\eta g\xi} \cdot W r. \end{aligned}$$

Jelikož se spotřeba udává v l/100 km, můžeme ponechat litry, avšak vzhledem k užití základních jednotek SI musíme jmenovatele převést na metry

$$100 \text{ km} = 100\,000 \text{ m} = 10^5 \text{ m}.$$

Rovnici tedy musíme dělit 10^5 (násobit 10^{-5}):

$$\begin{aligned} V &= \frac{k}{\eta} \cdot 10^{-5} \cdot \frac{W r}{m g \xi} \\ &= \frac{10}{0,35} \cdot 10^{-5} \cdot \frac{1 \cdot 30}{1\,200 \cdot 9,81 \cdot 0,05} \text{ l} \\ &\doteq 1,456 \cdot 10^{-5} \text{ l} \doteq 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ l} \doteq 0,015 \text{ ml}. \end{aligned}$$

Jestliže víme, že na 1 l potřebujeme 550 kJ energie, lze vypočítat, kolik energie bude třeba na 0,015 ml.

$$E = 550\,000 \cdot \frac{0,015}{1\,000} \text{ J} \doteq 8,25 \text{ J} \doteq 8 \text{ J}.$$

Elektromobil

Elektromobil využívá ke svému pohybu rovnou elektrickou energii, jejíž přeměny nejsou tak náročné, a dosahuje tak účinnosti (95 %) neporovnatelné s předchozími případy. Než přikročíme k úvahám o výrobě elektrické energie, uvážíme energetickou bilanci samotného pohybu. Určitou nevýhodu zde představuje rozmanitost a odlišnost jednotlivých modelů osobních elektromobilů, které znemožňují určení přibližného vzoru. Nelze tak vyloučit, že vyvozené závěry nejsou obecně platné. Opět zde platí určování valivého odporu a z něj plynoucí vyčíslení dráhy. Dále se však kroky od auta na benzín či naftu mírně liší, poněvadž výkon či účinnost elektromobilu jsou charakterizovány jeho dojezdem. Na určitý úsek trati (obvykle 100 km) připadá odpovídající spotřeba energie, tudíž se výpočty zjednodušují. Za vzor si vybereme dle zdrojů poměrně prodáváný vůz Tesla Model S. Jeho hmotnost by měla činit přibližně 2 100 kg a spotřeba energie 24 kWh na 100 km. V tomto ohledu lze k daným údajům zastávat i skeptický postoj, neboť další údaj hovoří o baterii s kapacitou 85 kWh na 426 km. Na 1 km tak připadá

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{24}{100} \text{ kWh} \cdot \text{km}^{-1} = 0,24 \text{ kWh} \cdot \text{km}^{-1}, \\ a_2 &= \frac{85}{426} \text{ kWh} \cdot \text{km}^{-1} = 0,20 \text{ kWh} \cdot \text{km}^{-1}. \end{aligned}$$

Tento rozpor (rozdíl 20 %) si lze vysvětlit buď z hlediska fyziky či chemie jakožto nestejnoměrný výkon baterie v závislosti na jejím nabití, či jakožto reklamní opomenutí společnosti pro

líbivější výsledky. Pro praktičnost a jednoduchost výpočtů budeme uvažovat konstantní výkon baterie a prvotně uvedené hodnoty spotřeby

$$\begin{aligned} rF &= \xi F_G \quad \Rightarrow \quad F = mg \frac{\xi}{r}, \\ W &= Fs \quad \Rightarrow \quad s = \frac{W}{F} = \frac{Wr}{mg\xi}, \end{aligned}$$

a tedy

$$\begin{aligned} \text{Sp} &= sk = \frac{k Wr}{mg\xi}, \\ \text{Sp}' &= E = \frac{Sp}{\eta} = \frac{k Wr}{\eta mg\xi}, \end{aligned}$$

kde

$$\frac{24 \cdot 10^3 \cdot 3600}{0,95} \cdot \frac{1 \cdot 30}{2100 \cdot 9,81 \cdot 0,05} \cdot 10^{-5} \text{ J} = 26,488 \text{ J} \doteq 27 \text{ J}.$$

Jak je z výsledku patrné, elektromobil spotřebuje na 1 J vykonané práce 27 J, tedy přibližně třikrát více než benzínový, či naftový automobil.

Z tohoto důvodu nemá valný smysl se (čistě z energetického hlediska) zaobírat nejúčinnějším způsobem zisku elektrické energie, když ta jako taková není nejúčinnější.

Samozřejmě nelze vyloučit, že elektromobil není závislý na fosilních palivech (pouze na lithiu). Otázky těžby lithia pro výrobu baterií zanedbáme, stejně jako tvorbu elektřiny v uhelných, jaderných (stabilních), solárních, přílivových (nestabilních) elektrárnách.

Na základě těchto dalších přidružených, avšak bezpodmínečně nutných nákladů si lze domyslet, že by celková náročnost elektromobilů byla ještě násobně vyšší.

Rovněž jsem shledal pozoruhodným tvrzení, že spotřeba elektromobilu (24 kWh/100 km) odpovídá zhruba ekvivalentu 2,6l benzínu.

Toto tvrzení, pokud by bylo interpretováno jako spotřeba, by jistě z elektromobilu udělalo oprávněně lákavou alternativu s až pětikrát nižšími provozními náklady.

Druhý způsob interpretace hovoří o energetické rovnosti, pokud by bylo takové množství benzínu spáleno. Ten má výhřevnost $40 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ a hustotu $750 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

$$\begin{aligned} E_1 &= E_2, \\ 24 \text{ kWh} &= Hm = H\rho V, \\ V &= \frac{24 \text{ kWh}}{H\rho} = \frac{24 \cdot 10^3 \cdot 3600}{40 \cdot 10^6 \cdot 750} \text{ m}^3 = \frac{24 \cdot 3,6}{40 \cdot 750} \text{ m}^3 \doteq 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 = 2,8 \text{ l}, \end{aligned}$$

což je blízké udávané hodnotě 2,6l.

Toto odkazování na údajnou výhodu spotřeby elektromobilu oproti benzínu je tak liché, neboť neporovnává energii nutnou na vykonání zvolené práce, nýbrž ideální stav při plném energetickém využití, o které princip spalovacího motoru ani neusiluje: vstříknuté palivo je využito na základě adiabatického děje a využívá tak energii méně účinně než prosté spálení, avšak stále efektivněji než elektromobil.

Vodík

Automobil na vodík využívá ke svému pohonu zkvalněný vodík, který může být buď spalován, což je méně časté, nebo reagovat s kyslíkem.

Základní principy pohybu automobilu jsou velmi podobné těm u elektromobilu, zde automobil dosahuje hmotnosti 1,8 t, motor účinnosti až 60 % a nádrž pojme až 6,3 kg vodíku, na který by měl ujet 600 km – 670 km. Tuto hodnotu pro praktičnost určíme na 630 km. Za vybraný vzor pro tyto technické parametry jsem zvolil Hyundai Nixa:

$$F = \frac{mg\xi}{r} \Rightarrow s = \frac{Wr}{mg\xi},$$

$$Sp = k \frac{Wr}{mg\xi} = \frac{6,3 \cdot 1 \cdot 30}{630 \cdot 1800 \cdot 9,81 \cdot 0,05} \text{ g} = 3,4 \cdot 10^{-4} \text{ g} = 3,4 \cdot 10^{-7} \text{ kg}.$$

Dále budeme uvažovat, že celý tento vodík bude spálen, takže by se mělo uvolnit spálené teplo (bude-li reakce izobarická): $H = 142 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$. V tomto případě volíme převod tepla v závislosti na hmotnosti, neboť určité množství vodíku (pokud neuniká), je charakterizován počtem molekul, z nichž každá má svou hmotnost – tedy hmotností. Jelikož je plyn možné zahřívat/chladit i stlačovat, lze počítání s hmotností považovat za objektivnější a nezávislejší.

Spálením takového množství vodíku se v ideálním případě uvolní energie o hodnotě:

$$E = Hm = 142 \cdot 10^6 \cdot 3,4 \cdot 10^{-7} \text{ J} \doteq 48,3 \text{ J}.$$

Z tohoto množství však automobil prakticky spotřebuje a zužitkuje pouze určitou část, jejíž horní hranice odpovídá maximální účinnosti:

$$E' = \eta E = 0,6 \cdot 48,3 \text{ J} \doteq 29 \text{ J}.$$

Tato hodnota je dosti blízká výsledku elektromobilu, podobně jako u něj tak dále ještě provedeme hrubou úvahu o přidružených nákladech – ty není třeba blíže určovat, neboť tato paliva stejně vycházejí méně výhodně než benzín.

Určité výdaje lze očekávat za výrobu (buď z neobnovitelného zemního plynu či elektrolýzou)

$$m = \frac{MI t}{FV},$$

$$t = \frac{m F V}{M I},$$

$$W = U I t = \frac{U I m F V}{M I} = \frac{m F V U}{M}.$$

Toto je energie, kterou potřebujeme na uvolnění vodíku o hmotnosti m elektrolýzou, přičemž U a I značí napětí a proud, při kterém elektrolýza probíhá, M je molární hmotnost vodíku, F je Faradayova konstanta a V je počet elektronů, které vodíku v dané molekule chybí do elektrické neutrality.

Dále víme, že pro praktičnost a efektivitu přepravy je tento plyn jak stlačený, tak i zkvalněný (tlakem i pomocí změny skupenství). Stlačení nemůže být z principu izochorické, práce tak může činit

$$W_{\text{bar}} = m c_p \Delta T$$

pro izobarické stlačení,

$$W_{\text{term}} = p_1 V_1 \ln \frac{V_1}{V_2}$$

pro izotermické stlačení,

$$W_{\text{ad}} = \frac{5}{2}(p_2 V_2 - p_1 V_1)$$

pro adiabatické stlačení, kde p_1 , V_1 , resp. p_2 , V_2 jsou tlak a objem plynu při počáteční resp. koncovém stavu, a c_p je měrná tepelná kapacita plynu za stálého tlaku.

Pro změnu fází (z plynné do kapalné) platí

$$L_v = ml_v = m \cdot 454 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1},$$

kde l_v je měrné latentní teplo varu vodíku.

Rovněž je třeba uvažovat, že teplota varu vodíku není nikterak vysoká – kolem 20 K, takže pokles teploty či změna tlaku musí být markantní.

Pokud po stlačení schází ještě určitá teplota k dosažení teploty varu odpovídající danému tlaku, musí se ještě odebrat energie

$$W = mc\Delta T.$$

Další nevýhodou vodíku je jeho reaktivita s kyslíkem, kdy dochází k výbuchu. Z tohoto důvodu je při skladování i transportu nutné dbát na jejich striktní oddělení, což dále zvyšuje celkové náklady.

Jak plyne ze známého příkladu vzducholodí, kromě hořlavosti a určité nevyzpytatelnosti se vodík vyznačuje i velmi malou hustotou a lehkými molekulami, jejichž průběžnému úniku je takřka nemožné zabránit.

Z tohoto hlediska lze vodík jednoznačně považovat za energeticky méně účinný než benzín.

Parní stroj

Ač by bylo možné parní stroj jednoduše označit za překonaný a pro osobní automobil jednoznačně nevyhovující (a vzhledem k množství kouře dopadajícího na ostatní automobily, jimž snižuje viditelnost, i nepraktický a nebezpečný), zkusíme totéž dokázat úvahami a výpočty.

Obvyklá účinnost parního stroje se drží v rozmezí 9 % – 15 %, což samo o sobě je velmi nízké, když spalovací motor dosahuje hodnot více než dvakrát vyšších, a elektromotor pak přes 90 %.

Již samotná účinnost předepisuje nutnost dostat do motoru či kotle na 1 J práce

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{W}{W_0}, \\ W_{0\min} &= \frac{W}{\eta} = \frac{1}{0,15} \text{ J} = 7 \text{ J}, \\ W_{0\max} &= \frac{W}{\eta} = \frac{1}{0,09} \text{ J} = 11 \text{ J}.\end{aligned}$$

Zde je třeba dále zohledňovat výhřevnost a kvalitu uhlí, které je spalované. Rovněž jeho samotná těžba (ať v lomu či šachtách) je jistě energeticky náročná. Benzín dosáhl hodnoty 8 J ($8 \in \langle 7, 11 \rangle$), lze tak bezpečně očekávat, že náklady na těžbu uhlí i uvažovanou výrobu automobilu přerostou – vždyť tak učinila i hodnota na 1 J při nižší účinnosti.

Parní stroj tak lze (alespoň v jeho uvažované podobě, neprojde-li renovacemi a inovacemi) považovat za nevhodný způsob pohonu osobního automobilu.

Vítr

Obecně lze za neúčinnější pohon považovat takový, který má co nejmenší náklady jak na výrobu samotného „motoru“ (či kotle a podobných klíčových zařízení sloužících na převod jednoho druhu energie na druhý), tak na zisk energie.

Z tohoto hlediska jsou nejvýhodnější obnovitelné zdroje – na rozdíl od dosud suverénně vedoucího benzínu nejsou limitovány konečným množstvím. Z nich se jakožto nepoužitelnější jeví vítr. Energie vody i slunečního záření je též téměř neomezená, avšak značně proměnlivá. Více limitujícím faktorem je však skutečnost, že se tato energie musí převádět na použitelnou ponejvíc skrze energii elektrickou, jejíž nedostatky byly popsány výše. Pro automobil je síla vody těžko použitelná a solární energie navíc potřebuje dosti nákladné (křemíkové) panely na převod, jež jsou omezeny dostatkem materiálu.

Geotermální energie je sice využitelná pro jednotlivé dobíjecí stanice, nelze ji ovšem využívat během jízdy, takže je závislá na možnosti dobíjení. Spalování biomasy se váže na její dostatečný přísun a zároveň se pravděpodobně nebude jednat o nejekologičtější zdroj.

Vítr se tedy úspěšně vyhýbá všem těmto úskalím – pro auto-loď je k dispozici neustále a jeho získávání netvoří žádnou přidanou práci, již by bylo nutno v celkové energetické bilanci zohlednit.

Auto-loď, zcela smyšlený druh pozemního dopravního prostředku, připomíná kostru automobilu, který navíc disponuje stěžněm a (pro snazší úvahy) jednou plachtou. Náklady na zhotovení plachty (energetické i materiální) si dovolíme odůvodněně považovat za zanedbatelné oproti nákladům na výrobu solárních panelů (kde je nutná precizní práce i těžba kovů).

Dále víme, že do pohybu auto-loď uvádí síla větru působící na plachtu o ploše S_1 a součiniteli odporu C_1 ; proti naopak působí odporová síla na profil auto-loďe, jehož plochu označíme S_2 a součinitel odporu C_2 (částečně však také i na plachtu, což nahradíme dvojnásobnou silou na profil) a též valivý odpor pneumatik.

Aby se auto-loď pohybovala, je nutná nejnižší rovnost síly tahové F_{tah} a sil odporu vzduchu F_{odp} a třecích $F_{\text{tř}}$. Pro rychlost větru v budeme uvažovat rozmezí bezvětří až $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, neboť tyto hodnoty by se dle Beaufortovy stupnice mohly za běžných okolností vyskytovat

$$\begin{aligned} F_{\text{tah}} &= 2F_{\text{odp}} + F_{\text{tř}}, \\ \frac{1}{2}C_1S_1\rho v^2 &= 2 \cdot \frac{1}{2}C_2S_2\rho v^2 + mg\frac{\xi}{r}, \\ S_1 &= \frac{2C_2}{C_1}S_2 + \frac{2mg\xi}{rC_1\rho v^2}, \end{aligned}$$

kde ρ značí hustotu vzduchu.

Aby výsledky nebyly zkresleny příliš optimistickým uvažováním, budeme uvažovat hmotnost auto-loďe $m = 1500 \text{ kg}$, přičemž toto nadsazení snad dostatečně kompenzuje učiněná zjednodušení (např. dokonalá nepropustnost plachty).

Součinitel odporu pro plachtu odhadneme $C_1 = 1,2$ a pro trup auto-loďe $C_2 = 2,0$, přičemž jeho šířka činí $a = 1,7 \text{ m}$ a výška $b = 1,5 \text{ m}$. Rameno valivého odporu činí opět $\xi = 0,05 \text{ cm}$

a poloměr pneumatik $r = 30 \text{ cm}$

$$S_{1\max} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 1,7 \cdot 1,5}{1,2} + \frac{2 \cdot 1500 \cdot 9,81 \cdot 0,05}{30 \cdot 1,2 \cdot 1,3 \cdot 1^2} \text{ m}^2,$$

$$S_{1\min} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 1,7 \cdot 1,5}{1,2} + \frac{2 \cdot 1500 \cdot 9,81 \cdot 0,05}{30 \cdot 1,2 \cdot 1,3 \cdot 15^2} \text{ m}^2,$$

$$S_{1\max} = 39,9 \text{ m}^2,$$

$$S_{1\min} = 8,7 \text{ m}^2.$$

Jelikož plachty nemůžeme uvažovat podobně jako palivo, kdy na vymezenou vzdálenost připadá přesně vymezená spotřeba, je velice obtížné být i jen odhadnout náklady na jejich tvorbu. Rovněž časem dochází k jejich opotřebení, v případě bouřlivějšího počasí nepochybně dříve.

Životnost plachty odhadneme na $s_z = 200 \text{ km}$, přičemž náklady na její zhotovení (i s časovým zohledněním péče o rostliny a provoz přádelen) mohou činit $E_v = 1 \text{ MJ}$.

Zároveň pro vykonanou práci větrem platí:

$$W = F s,$$

$$s = \frac{W}{F} = \frac{1 \text{ J}}{\frac{1}{2} C_1 S_1 \rho v^2},$$

$$s_{\max} = \frac{2}{1,2 \cdot 39,9 \cdot 1,3 \cdot 1^2} \text{ m} = 3,2 \text{ cm},$$

$$s_{\min} = \frac{2}{1,2 \cdot 8,7 \cdot 1,3 \cdot 15^2} \text{ m} = 0,065 \text{ cm}.$$

Na 1 J vykonané práce tak připadá (nejvýše, tedy při co nejnevýhodnějším uspořádání)

$$E = \frac{s_{\max}}{s_z} E_v = \frac{3,2 \cdot 10^{-2} \text{ m}}{200 \cdot 10^3 \text{ m}} \cdot 10^6 \text{ J} = 0,16 \text{ J}.$$

Z energetického hlediska (vzhledem k nákladům člověka) se tak jeví pozemní koráby u nichž na 1 J vykonané práce připadá přibližně $1/6 \text{ J}$.

Je však třeba uznat, že jsou zcela závislé na nezmarech počasí, i když případný směr jízdy by mohlo ovlivnit a změnit na ten kýžený křížování. Zde však vyvstává problematika uskutečnitelnosti, neboť omezený prostor silnice neumožňuje takové manévry.

Případná úprava tak, aby auto-loď zdolala i polní terén, by ve většině interpretací zahrnovala změnu pneumatik, což by odporovalo učiněným úvahám s výše zvolenými číselnými hodnotami. Také je pravděpodobné, že i případná schopnost zdolat např. pole automaticky neznamená povolení jej překonat (kvůli ztrátě úrody).

Ve zkratce lze tento způsob přepravy uvažovat za energeticky úspornější, avšak neuskutečnitelný.

Závěr

Seřazení způsobů pohonu dle efektivity:

- auto-loď – $0,16 \text{ J} \cdot \text{J}^{-1}$
- benzín – $8 \text{ J} \cdot \text{J}^{-1}$
- elektřina – $27 \text{ J} \cdot \text{J}^{-1}$

- vodík – $29 \text{ J} \cdot \text{J}^{-1}$
- parní stroj
- kůň (zvíře)

Zároveň je však zřejmé, že první prostředek je pouze ideálním konceptem bez praktického využití či alespoň aktuálního uplatnění.

Jistou vadou benzínu představuje jeho závislost na fosilních palivech, té se však skrze lithium nevyhýbá ani elektromobil a skrze uhlí parní stroj. Z tohoto hlediska lze za ryze nezávislý zdroj pohonu považovat pouze automobil na vodík (a případně sílu zvířat).

Za nejúčinnější způsob pohonu osobního automobilu lze považovat benzín.

Komentář opravovatele

S výše napsaným souhlasím v plném rozsahu, vyjma kapitoly vítr, která obsahuje určité faktické nesrovnalosti a chyby, např. co se odporu vzduchu týče – při společném pohybu se zde uvažovaným proudem masy vzduchu se bude odpor prostředí uplatňovat minimálně a mnohem komplikovaněji. Dvousetkilometrová životnost plachty je extrémně pesimistický odhad, vzhledem k tomu, co vydrží plachty na závodních plachetnicích.

Jan Bajer

jan.bajer@fykos.cz

Fyzikální korespondenční seminář je organizován studenty MFF UK. Je zastřešen Oddělením propagace a mediální komunikace MFF UK a podporován Ústavem teoretické fyziky MFF UK, jeho zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků. Realizace projektu byla podpořena Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy.

Toto dílo je šířeno pod licencí Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported.
Pro zobrazení kopie této licence navštivte <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>.