

ENERGETICKÁ BILANCIA AUTOMOBILU SO SPAĽOVACÍM MOTOROM A S ELEKTRICKÝM MOTOROM. ENVIRONMENTÁLNE ASPEKTY

Peter PODHORANSKÝ

ENERGY BALANCE SHEET OF A CAR WITH AN COMBUSTION ENGINE AND AN ELECTRIC ENGINE. ENVIRONMENTAL ASPECTS



ABSTRAKT

Zámerom príspevku je poukázať na environmentálne aspekty pri využívaní spaľovacích a elektrických motorov s prihliadnutím na efektívnosť využitia dostupných energetických zdrojov.

KLÚČOVÉ SLOVÁ: energetická bilancia, automobil, environment

ABSTRACT

The aim of the paper is to point out environmental aspects in the use of internal combustion and electric engines with regard to the efficiency of utilization of available energy sources.

KEY WORDS: energy balance, car, environment

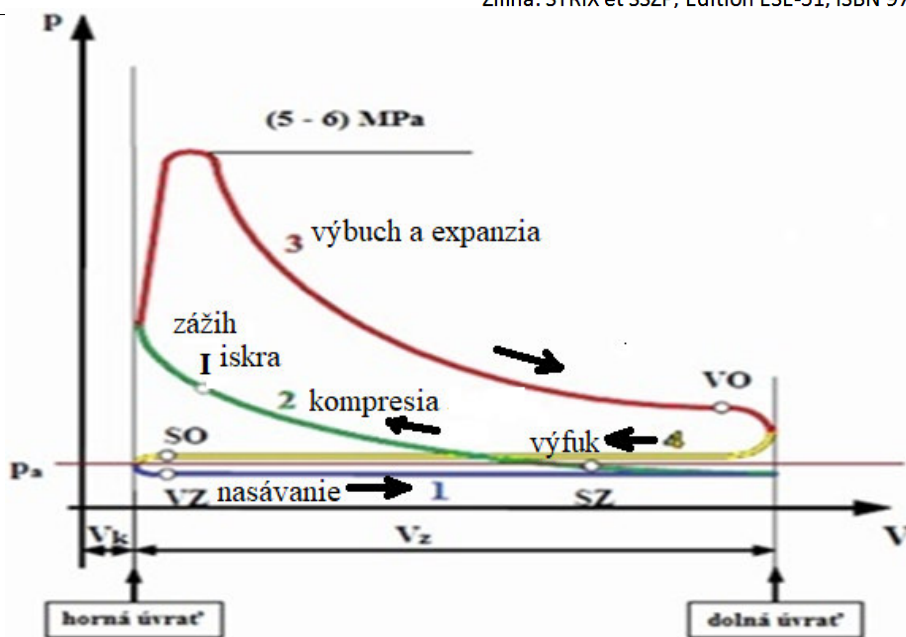
Úvod - energetická bilancia spaľovacieho motora

Ako najčastejší spaľovací motor sa v súčasnosti používa piestový štvortaktný zážihový alebo vznietový spaľovací motor s kvapalným palivom. Ako palivo sa používa hlavne benzín s bio prísadou lieh alebo nafta s bio prísadou metylester repky olejnej. Existujú aj alternatívne palivá, ako stlačený zemný plyn (CNG), skvapalnený propán-bután (LPG, Liquefied Petroleum Gas), prípadne perspektívne stlačený vodík.

Zdrojom energie pre spaľovací motor je teplo, ktoré vzniká pri spaľovaní paliva. Spomínané palivá majú rôznu energetickú výdatnosť. Porovnanie energetickej výdatnosti palív uvidíme neskôr.

Činnosť štvortaktného motora

Pracovný diagram štvordobého motora je na obr. 1.



Obr. 1 Pracovný diagram štvordobého motora

1. Nasávanie – piest sa pohybuje z hornej úvrate do dolnej úvrate a v dôsledku vznikajúceho podtlaku (10 – 20 kPa) sa do valca nasáva čerstvá zmes. Bod SO znázorňuje počiatok otvorenia sacieho ventilu. K tomu dochádza ešte pred hornou úvratou, aby bol sací ventil plne otvorený v okamihu, keď sa vo valci objaví podtlak. Dochádza tiež k vypláchnutiu kompresného priestoru (pozri výfuk). Sací ventil je úplne uzavretý v bode SZ, teda až za dolnou úvratou. Využíva sa tým kinetická energia zmesi prúdiacej sacím kanálom, vzniknutá zotrvačnosťou, pre maximálne naplnenie valca motora. Tento jav je nazývaný „samopreplňovací efekt“.

2. Kompresia a zážih – piest sa pohybuje z dolnej úvrate do hornej úvrate a stláča zmes, ktorá sa ohrieva na teplotu, ktorá môže dosahovať až 450°C. Vďaka tomu sa palivo odparí a pary sa lepšie zmiešajú so vzduchom. Zmes je zapálená elektrickou iskrou ešte pred hornou úvratou – bod I. Aby bola dosiahnutá čo najvyššia tepelná účinnosť obehu je treba, aby podstatná časť paliva zhorela čo najbližšie hornej úvrati a aby maximálny tlak vo valci nastal 12 – 15° otočenia kľukového hriadeľa za hornou úvratou. Keďže proces horenia zmesi trvá určitý čas (0,001 s pre benzín), je treba zmes zapáliť s určitým predstihom. Tento jav nazývame predstih zážihu. Čas horenia sa za normálnych podmienok príliš nemení, preto je potrebné regulovať predstih v závislosti na otáčkach motora. Pri vznietovom motore sa palivo nezapaľuje iskrou, ale pred hornou úvratou sa vstrekuje palivo, ktoré sa vznieti od kompresného tepla. Pri moderných motoroch vstrekuje palivo pokračuje aj po hornej úvrati a zvyčajne sa delí na niekoľko vstrekovacích dávok, ktoré regulujú nárast tlaku vo valci.

3. Výbuch a expanzia – po zapálení paliva nastáva proces horenia, pričom sa prudko zdvihne tlak, ktorý dosiahne svoju maximálnu hodnotu okolo 5 – 6 MPa (u vznietových motorov 7 – 8 MPa) a teplota zmesi vystúpi v centre spaľovania až na 2500 °C. Vzniknuté plyny expandujú veľkou rýchlosťou a tlačia piest do dolnej úvrate, pričom ich tlak a teplota klesá.

4. Výfuk – ešte pred dosiahnutím dolnej úvrate sa otvára výfukový ventil – bod VO. Tlak vo valci je značne vyšší ako tlak vo výfukovom potrubí, preto po otvorení výfukového ventilu pretlak vytlačí spaliny z priestoru valca do potrubia. Po priechode piestu dolnou úvratou sú spaliny z valca vytlačované pohybujúcim sa piestom. Experimentálne sa zistilo, že kladná práca obehu stratená otvorením výfukového ventilu pred dolnou úvratou je menšia ako nárast práce potrebný pre vytlačenie spalín z valca motora piestom pri otvorení výfukového ventilu v dolnej úvrati. Piest je schopný vytlačiť spaliny iba zo zdvihového objemu, pričom v kompresnom priestore spaliny zostávajú. Keďže odtekajúce spaliny vplyvom vlastnej kinetickej energie pokračujú ďalej do výfukového potrubia aj po zastavení piesta v hornej úvrati, vytvára sa v kompresnom priestore podtlak. Tento jav môžeme

zúžitkovať práve otvorením sacieho ventilu pred hornou úvratou na takzvané „vypláchnutie kompresného priestoru“, teda podtlakom sa nasaje čerstvá zmes, ktorá zároveň vytlačí zvyšky spalín. Doba, kedy je zároveň otvorený sací aj výfukový ventil, sa nazýva prekrytie ventilov. Výfukový ventil sa uzavrie 15 – 50° po hornej úvratí – bod VZ.

Optimálne načasovanie otvárania a zatvárania ventilov má veľký vplyv na účinnosť motora a závisí na podmienkach v ktorých motor pracuje – napr. na otáčkach. Preto sa v poslednej dobe rozširujú systémy variabilného časovania ventilov.

Využitie energie v spaľovacom motore

Vytváranie mechanickej práce z tepelnej energie paliva sa v optimálnom prípade dá opísať tzv. Carnotovým cyklom. Teoreticky tento cyklus prvýkrát opísal Nicolas Léonard Sadi Carnot, po ktorom je aj pomenovaný. Carnotov cyklus opisuje prácu ideálneho tepelného stroja. Z Carnotovho cyklu sa dá určiť maximálna účinnosť tepelného stroja.

V automobilovej technike je uzavretý tepelný cyklus realizovaný pomocou štvordobého motora. Je zložený zo štyroch pracovných dôb, ktoré sú na obrázku č. 1 farebne vyznačené a očíslované.

Tepelná účinnosť je bezrozmerné číslo, ktoré vyjadruje ako účinne tepelný stroj pracujúci s uzavretým tepelným cyklom premieňa privedenú tepelnú energiu na prácu. Tepelná účinnosť sa označuje symbolom η_t . Výraz $(1 - \eta_t)$ opisuje tepelné straty. Pretože pri uzavretom cykle nedochádza k zmene vnútornej energie sústavy, na základe prvého termodynamického zákona platí rovnica:

$Q_p - Q_o - W_p + W_k = 0$, kde:

- Q_p : teplo privedené do cyklu
- Q_o : teplo odvedené z cyklu
- W_p : práca vykonaná cyklom
- W_k : práca spotrebovaná cyklom

Termodynamickú účinnosť tak môžeme vyjadriť ako pomer získanej práce k množstvu privedeného tepla:

$$\eta = \frac{W}{Q_p} \quad \text{alebo inak:} \quad \eta = \frac{W_p - W_k}{Q_p} = \frac{Q_p - Q_o}{Q_p} = 1 - \frac{Q_o}{Q_p}$$

V reálnom motore sa teplo privedené v palive sa v spaľovacom motore rozdelí nasledovne:

$Q_d = Q_e + Q_{ch} + Q_v + Q_{ns} + Q_{ol} + Q_{zv}$

- Q_d - teplo dodané v palive
- Q_e - teplo ekvivalentné užitočnej práci motora (zdroj pohybu automobilu)
- Q_{ch} - teplo odvedené do chladiacej sústavy
- Q_v - teplo odvedené výfukovými plynmi
- Q_{ns} - teplo nevyužitá nedokonalým spálením paliva, nazývané aj chemické straty
- Q_{ol} - teplo odvedené mazacím olejom
- Q_{zv} - teplo nezahrnuté v predošlých členoch (iné straty)

Tepelná energia, ktorá spôsobuje ohrev motora a spalín (Q_{ch} , Q_v , Q_{ol}) je nevyužiteľná a nazýva sa stratovou energiou. Z tepla ekvivalentného užitočnej práci Q_e sa ešte časť spotrebuje na mechanické straty (trenie a pohon pomocných agregátov). Účinnosť motora zodpovedá množstvu tepla Q_e ekvivalentného užitočnej práci motora (zdroj pohybu automobilu). V tabuľke

Druh motora	% Q_e	% ($Q_{ch} + Q_{ol}$)	% Q_v
zážihový	21 až 28	12 až 27	30 až 55
vznetový	29 až 42	15 až 35	25 až 45

sú uvedené hodnoty pre zážihový a vznetový motor, platné koncom 20. storočia. V súčasnosti sa vďaka rozsiahlemu využitiu elektroniky, sofistikovaných spôsobov nepriameho a priameho vstrekovania a preplňovania motora dosahuje pre oba typy motorov účinnosť približne 40%. (<https://www.youtube.com/watch?v=W2aY981XWY8>).

Pre činnosť motora je nevyhnutný zdroj energie v podobe paliva. Rôzne palivá sa dajú porovnať pomocou ich kalorickej hodnoty, vztiahnutej na 1 kg alebo jeden liter.

Palivá pre spaľovací motor. Porovnanie kalorickej hodnoty (výhrevnosti, mernej energie) palív

Pri porovnávaní budeme používať konštantu prepočtu $1 \text{ MJ} = 0,2778 \text{ kWh}$.

Merná energia benzínu: $43,5 \text{ MJ/kg} = 12,08 \text{ kWh/kg}$, Merná energia nafty: $41,9 \text{ MJ/kg} = 11,64 \text{ kWh/kg}$, Merná energia propánu: $12,87 \text{ kWh/kg}$, Merná energia butánu: $12,72 \text{ kWh/kg}$

Vidíme, že výhrevnosť fosílnych palív je približne rovnaká. Vzhľadom na tepelnú účinnosť motora sa z tejto výhrevnosti na pohyb automobilu využije cca 40%, čiže z 1 kg paliva sa na pohyb využije približne 5 kWh energie. Zvyšok, teda cca 7 kWh sa premení na teplo, ktoré sa musí chladičom motora rozptýliť do okolitého prostredia, resp. v zimnom období sa využije na vyhrievanie kabíny vozidla.

Energetická bilancia elektrického pohonu

Samotný elektrický motor je veľmi účinný stroj. Moderné elektromotory majú aj pri zarátaní strát v regulačných obvodoch približne 90% účinnosť. Pri využití vo vozidle navyše vystupuje výhoda jednoduchosti konštrukcie pohonnej jednotky a absencia akýchkoľvek prevádzkových kvapalín okrem brzdovej kvapaliny v hydraulickom systéme brzd. Problematickým, a to aj v súčasnosti, však zostáva zdroj elektrickej energie.

Elektrické zdroje energie

Vzhľadom na podmienku mobility prichádzajú do úvahy rôzne druhy akumulátorov. Sú uvedené na obr. 2.

Typ akumulátora	Merná energia [Wh/kg]	Počet nabíjajúcich cyklov
Olovený (Pb)	10 – 30	400
Pb-Zvitkový	10 – 25	400
Nikel- kadmiový	28 – 50	2000
Nikel-metal-hydridový	48 – 82	700
Sodík-nikel-chloridový	80 – 120	450
Lítium-metal-polymérový	107 – 175	600
Lítium-iónový	42 – 180	1200
Superkapacitor	cca 8	10^5 - 10^6

Obr. 2 Hodnoty parametrov pre určitý typ akumulátora <http://www.posterus.sk/?p=18414>

V súčasnosti je bežne používaný lítium iónový akumulátor s mernou energiou maximálne okolo 180 Wh/kg. Pre porovnanie so spaľovacím motorom je potrebné zvážiť ešte 90% účinnosť

elektromotora, takže v najlepšom prípade môžeme počítať s využiteľnou mernou energiou cca 160 Wh/kg. Pri porovnaní s 5 kWh/kg u spaľovacieho motora je to cca 31 krát menej. Z oho vyplýva, že pri rovnakej hmotnosti energetického zdroja sa dá očakávať približne 31 krát menší akčný rádius (dojazd) elektromobilu. Tento fakt vysvetľuje aj to, že sa dodnes neobjavilo využitie elektrickej mobility u lietadiel, kde hmotnosť mobilného prostriedku hrá rozhodujúcu úlohu.

V literatúre https://www.autorevue.cz/cas-elektromobilu-jeste-neprisel_1 sa uvádza, že z hľadiska využiteľnosti pre jazdu 550 kg nabitých akumulátorov (53kWh) Audi R8 e-tron zodpovedá 20,5 litrom benzínu.

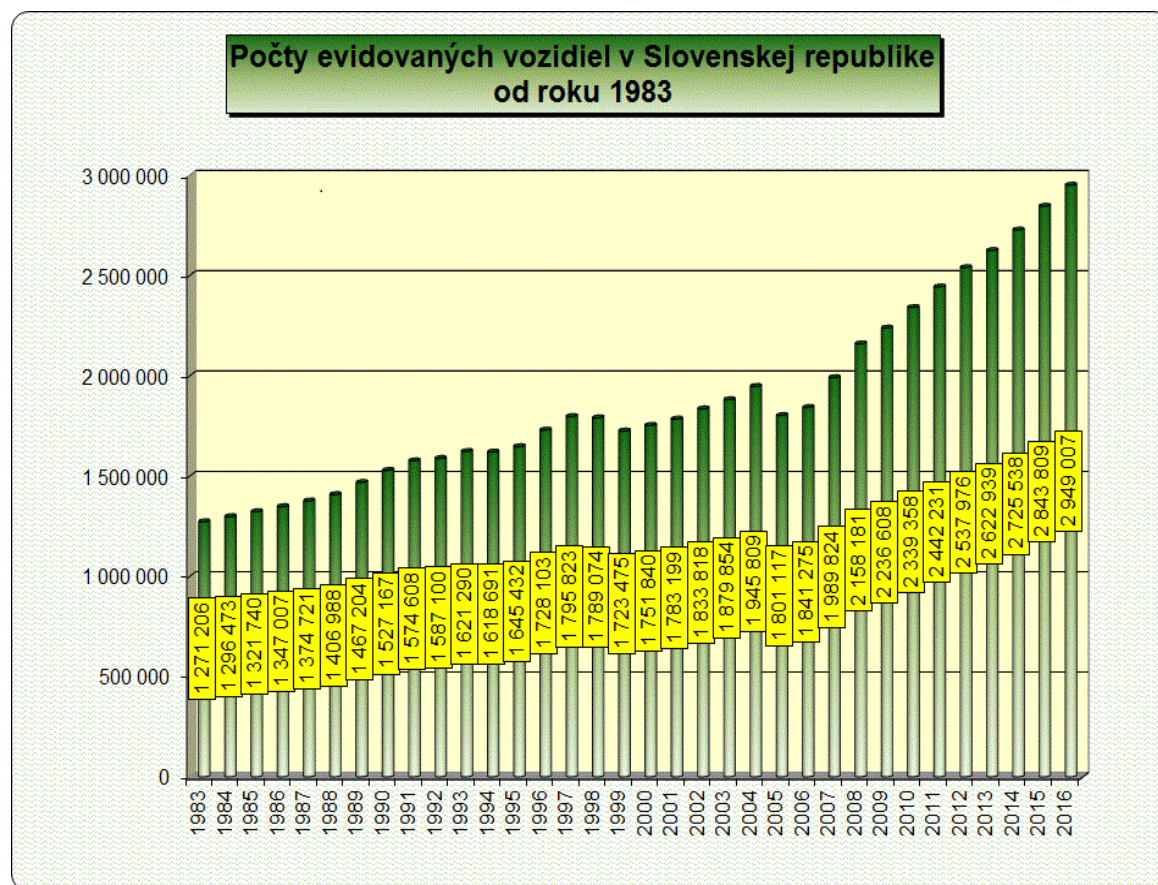
Pre porovnanie uvádzame hmotnosti elektromobilu Tesla a vybraných neelektrických limuzín vyššej triedy.

- **Tesla, Maximum Range:** 2223 kg pohotovostní, 2640 kg celková
<https://www.autohled.cz/a/tesla/model-s/hmotnost>
- **Ferrari F488 Pista:** o 868 kg ľahší (1.4t, motor 3.9,) **Ford GT:** o 838 kg ľahší (1.4t, motor 3.5,)
- **Lamborghini Huracán:** o 834 kg ľahší (1.4t, motor LP580-2,) **Ferrari F8 Tributo:** o 788 kg ľahší (1.4t, motor 3.9,) **Porsche 911 GT3 RS:** o 718 kg ľahší (1.5t, motor GT3 RS,), Škoda Octavia o 718 kg ľahší (1.5t, motor 1,5 TSI).

Hmotnosti ekvivalentných vozidiel s motorom na fosílné palivo sú teda priemerne o 694 kg menšie.

Počet motorových vozidiel, evidovaných na Slovensku je uvedený na obr. 3 (podľa stránky Ministerstva vnútra)

https://www.minv.sk/swift_data/source/policia/1tec/1statistiky_evo_xml/grafy/2016/2016-celkovo%20evidovane%20vozidla.gif.



Obr. 3 Počet motorových vozidiel, evidovaných na Slovensku

Ak použijeme hrubý odhad, že denne je v prevádzke približne jeden milión osobných automobilov, ktoré by sme nahradili elektromobilmi, celková denne zbytočne prevážaná hmotnosť by bola 694 miliónov kg, čo je 694 tisíc ton.

Pri praktickej jazde prevádzke je potrebné vozidlo aj zastaviť a rozbehnúť. Keď na jedno nabitie (dojazd 300km) uvažíme v mestskej prevádzke 300 zabrzdení a rozjazdov na rýchlosť 50km/h=13,88m/s, spotrebovaná kinetická energia bude

$$E = 300 \cdot \frac{1}{2} \cdot 694 \cdot (13,88)^2$$
$$E = 150 \cdot 694 \cdot 192,654 = 20\,049\,660 \text{ J [Ws]} = 5,57 \text{ kWh}$$

na jedno vozidlo. Určitú časť energie môžeme ušetriť rekuperáciou, ale pri malých rýchlostiach a potrebe rýchlej brzdnéj reakcie až k zastaveniu vozidla to nie je významná časť. Ak je teda v úvahu cca 1 miliónov vozidiel, celková naviac stratená energia oproti ľahšiemu automobilu so spaľovacím motorom môže pri nájazde 300 km denne dosiahnuť približne 5 miliónov kWh, alebo 5 000 MWh. Aj pri menšom nájazde je to celkom významná hodnota.

Elektrickú energiu dnes vyrábame v tepelných, alebo jadrových elektrárňach. Ostatné zdroje dnes možno považovať za marginálne. V prípade tepelných elektrární sa tepelná energia fosílného paliva mení na pohybovú v turbínach, ktorých účinnosť je vyššia, ako je účinnosť piestových motorov v automobiloch. Mohli by sme teda očakávať, že aspoň z tohto hľadiska je použitie elektrickej energie na pohon vozidiel ekologickejšie. Nie je to však pravda, pretože elektrická rozvodná sieť z elektrárne k spotrebiteľovi prináša so sebou straty, ktoré súvisia s rozvodmi a nevyhnutnou transformáciou napätia smerom nahor na strane elektrárne a späť u spotrebiteľa nadol. Podľa údajov elektrorozvodných závodov na faktúrach straty majú hodnotu cca 8%. To znamená, že ekologický zisk v podobe vyššej účinnosti výroby elektrickej energie v optimalizovaných podmienkach elektrární je prakticky anulovaný. Naviac, v prípade potreby rýchleho nabíjania elektromobilu je potrebné vybudovať sieť rýchlonabíjajúcich staníc, ktoré musia byť schopné dodať až 10 násobne väčšie výkony, aké sú obvyklé v dnešnej spotrebiteľskej elektrickej sieti. To by znamenalo kompletné prebudovanie rozvodného systému a s tým súvisiacou ekologickou záťažou.

Ďalšie straty vznikajú pri nabíjaní akumulátora, pretože nabíjacie zariadenia a chemické procesy, prebiehajúce v akumulátore nemajú vyššiu účinnosť ako 90%. Naviac, elektromobil musí na rozdiel od automobilu so spaľovacím motorom používať na vykurovanie kabíny čistú elektrickú energiu a takto sa mu skracuje dojazd. Ako sme uviedli, spaľovací motor produkuje pri svojej činnosti teplo, ktoré sa v lete celé musí vyžiariť chladičom vozidla. V zimnom období sa časť zo stratového tepla presmeruje do kabíny cestujúcich.

Záver

Treba si uvedomiť, že medzi priamym spaľovaním fosílnych energetických zdrojov a ich využívaním v tepelných strojoch nie je príliš veľký rozdiel. Bežne dostupné stroje sú schopné na mechanickú alebo elektrickú energiu premeniť len 30-45% tepelnej energie, bez ohľadu na to, či ide o motory automobilov, turbíny prúdových lietadiel, alebo turbíny v elektrárňach. Zvyšok tepelnej energie sa musí rozptýliť do okolia, inak by tepelný stroj nemohol fungovať. To vyplýva z fyzikálnych zákonov. Teda súčasná technologická spoločnosť neohrieva atmosféru len zvyšovaním obsahu CO₂ v atmosfére, ale aj priamym uvoľňovaním tepla v spotrebičoch fosílnych palív, nech sú využívané v akejkoľvek forme. Nesmieme zabudnúť, že to platí aj o elektromobiloch, pretože elektrická energia potrebná pre nabíjanie elektromobilov je vytváraná okrem jadrových elektrární iba v elektrárňach, spaľujúcich fosílnu palivá. Elektrickú energiu z fotopanelov možno úplne zanedbať. Pokiaľ sa elektrická energia získava v elektrárňach so spaľovaním fosílnych palív, z hľadiska tepelného znečistenia Zeme sú elektromobily rovnako škodlivé ako automobily s bežným spaľovacím motorom. Naviac v dôsledku nevyhnutných akumulátorov majú výrazne väčšiu hmotnosť, čo je energeticky



nevýhodné (napr. vozidlo Tesla je o cca 700kg ťažšie ako ekvivalentná limuzína so spaľovacím motorom, pozri str. 5.). Navyiac v zimnej prevádzke, keď je potrebné kúriť, automobil so spaľovacím motorom využíva na tento účel „odpadové“ teplo, takže zimná prevádzka je ekologickejšia ako letná. Elektromobil musí na vykurovanie kabíny používať čistú elektrickú energiu a takto sa mu skracuje dojazd. Jedinou výraznou výhodou elektromobilov je neprítomnosť exhalátov, čo je zaujímavé v mestskej prevádzke, hoci použitej elektrickej energii zodpovedajúce CO₂ a exhaláty sa len presunú do elektrární. Tam sa síce lepšie rozptýlia, ale zostávajú v atmosfére. Navyiac je ťažké predvídať, ako by sa zachovali štáty voči cene elektriny pri súčasnej dani 400-500€ na tisíc litrov uhl'ovodíkového paliva, keby sa väčšina energetickej spotreby automobilov presunula na elektrinu. <https://www.aktuality.sk/clanok/551726/zvysuje-sa-dan-pri-benzine-aj-nafte/> . Už dnes sú avizované zvýšené ceny elektriny a to pre všetkých spotrebiteľov, takže paradoxne na prevádzku elektromobilov prispievajú všetci obyvatelia, bez ohľadu na to, že elektromobil vôbec nepoužívajú.

Z pohľadu uvedených faktov možno urobiť dve konštatovania:

- V súčasnosti spĺňa prijateľné ekologické kritériá elektromobil s malou a ľahkou batériou ako mestské vozidlo s dojazdom cca 50km s denným „plug-in“ nabíjaním z bežne dimenzovanej zásuvky bez potreby budovania siete drahých nabíjacích staníc.
- Pre automobil s dlhším dojazdom je v súčasnosti favoritom hybridný automobil, ktorý nateraz dokáže optimálnejšie skombinovať výhody oboch druhov pohonu.

ADRESA AUTORA

Doc. Ing. Peter PODHORANSKÝ, PhD.

Slovenská spoločnosť pre životné prostredie, Kocel'ova 15, 815 94 Bratislava, Slovenská republika

e-mail: <peter.podhoransky@gmail.com>

RECENZIA TEXTOV V ZBORNÍKU

Recenzované dvomi recenzentmi, členmi vedeckej rady konferencie. Za textovú a jazykovú úpravu príspevku zodpovedajú autori.

REVIEW TEXT IN THE CONFERENCE PROCEEDINGS

Contributions published in proceedings were reviewed by two members of scientific committee of the conference. For text editing and linguistic contribution corresponding authors.