



Spotřeba paliva u automobilů s vodíkovým článkem

Vodík zatím není vnímán jako hlavní palivo osobní dopravy budoucnosti i přes fakt, že oproti bateriovým elektrickým automobilům mají vodíkové automobily některé výhody. Článek se zaměřuje především na průměrnou spotřebu vodíku, kolísání průměrné spotřeby vlivem ročního období a kvantitativní analýzu faktoru využívání klimatizace a topení a jejich vliv na spotřebu u vozidel s vodíkovým palivovým článkem (FCEV).

Automobily s vodíkovým palivovým článkem (FCEV) jsou vozy, které využívají elektrickou energii vyrobenou palivovým článkem k zajištění hnací síly a pohonu ostatního příslušenství vozidla. Prakticky téměř všechny velké automobily berou potenciál vodíkového pohonu v potaz a mají dnes koncept nebo sériový vůz na vodík. Celkově spatřilo světlo světa více než 50 různých konceptů vodíkových osobních automobilů. V posledních deseti letech dosáhla vozidla s vodíkovým palivovým článkem značného pokroku, pokud jde o přizpůsobivost k prostředí, výkon a dojezd. Dojezd hraje u množství potenciálních uživatelů zásadní roli a společně s kratším časem plnění vodíku (do 5 minut) lze hovořit o výhodách elektrických vozidel s palivovým článkem vůči bateriovým elektrickým vozům. Hospodaření s energií v moderních automobilech je z mnoha hledisek zásadní otázkou a udávané hodnoty průměrných spotřeb výrobcem jsou slibné. Nejrozšířenější výrobci automobilů s palivovým článkem jsou Toyota s modelem Mirai a Hyundai s modely ix35 fuel cell a Nexa fuel cell. Toyota udává optimistickou průměrnou spotřebu 0,8 kg H₂/100 km a u druhé generace modelu Mirai, již podle cyklu WLTP uvádí 0,89 kg H₂/100 km.



Zkušenosti z praktického provozu vodíkových automobilů jsou zatím malé (na snímku vozidlo Toyota Mirai) Foto archiv/Toyota

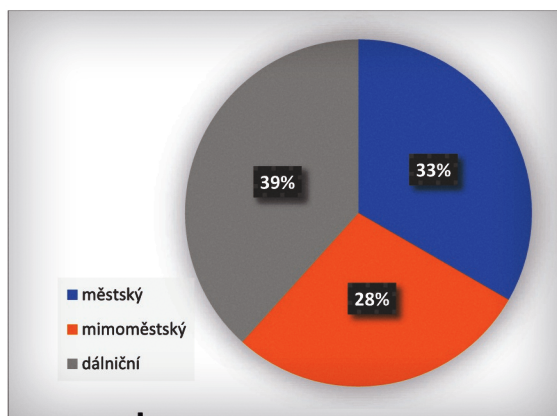
Hyundai udává striktně 0,95 až 0,96 kg H₂/100 km.

Spotřeba automobilu se spalovacím motorem bývá nejnižší pro konstrukčně danou rychlost, zpravidla 80 až 90 km/h. Což u vozů poháněných elektromotorem zcela neplatí. Důvodem je u naprosté většiny elektromobilů absence převodových stupňů a rozdílná momentová charakteristika elektromotoru. Je pravdou, že elektromotor dosahuje nejvyšší účinnosti ve středních otáčkách, ale ve vyšších rychlostech spotřeba roste vlivem vyššího tření, zejména odporu vzduchu. Výsledná spotřeba se také mění podle režimu jízdy, odlišná bude při plynulé jízdě po dlouhou dobu po dálnici a jiná při popojíždění ve městě. Spotřebu automobilu mohou ovlivňovat zejména tyto faktory: váha a aerodynamika automobilu, povětrnostní podmínky a ostatní okolní klimatické podmínky, hustota provozu, styl jízdy řidiče, používání klimatizace a topení, obutí automobilu, naložení automobilu zavazadly a počet pasažérů, doplňková výbava jako vyhřívání sedadel, oken aj., technická vyspělost a optimalizace systému palivového článku, úložistiště energie a pohonu. V tomto článku budeme blíže rozebírat vliv faktoru klima-

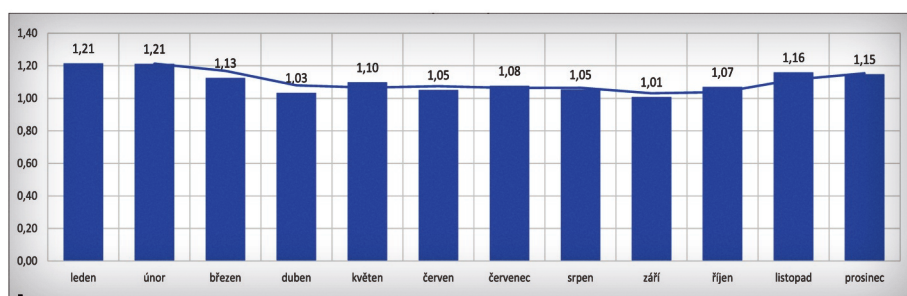
tizace a topení. Dříve byla klimatizace výsadou luxusnějších modelů a výbav, kde se montovala za značný příplatek, ale v dnešních automobilech je dostupná i v těch nejlacinějších modelech a ojeté vozy bez klimatizace se mohou například potýkat s menším zájmem na trhu.

Metodika a materiál

Pro určení reálné průměrné spotřeby vodíku a znázornění chování uživatelů jsou převzata data o spotřebách vodíku z databáze Spritmonitor.de. Jedná se o online webový nástroj pro sledování spotřeby a celkových nákladů vlastnictví automobilu pro jejich uživatele, do které lze zaznamenat data o tankování paliva. Databáze na Spritmonitor.de obsahuje téměř jeden milion vozidel a lze ji považovat za dostatečně reprezentativní pro německý vozový park.¹ Data od každého registrovaného řidiče jsou online volně vyhledatelná a přístupná. Byl vybrán soubor deseti uživatelů převážně soukromě používaných automobilů s vodíkovým palivovým článkem nahlášených v registru od roku 2016. Data byla stažena dne 22. 8. 2021 s průměrem 57 záznamů tankování na jednoho uživatele během celého roku. K dispozici jsou data



Graf 1 – Poměr provozu z posuzovaného souboru dat Zdroj: CDV



Graf 2 – Průměrné spotřeby podle měsíců

Zdroj: CDV

o vozech Toyota Mirai 2x 1. generace a 1x 2. generace, 3x Hyundai Nexa, 3x Hyundai ix35 fuel cell a 1x Hyundai Santa Fe fuel cell.

Uživatel na svém uživatelském profilu může vytvořit kartu automobilu, do které následně vkládá data jako množství natanokovaného paliva současně s ujetou vzdáleností na dané tankování. Podle těchto dat lze přesně určit spotřebu automobilu. Dále může uživatel vyplnit data jako cenu a typ tankovaného paliva, informace o ujetých kilometrech, roční období, typ silnic a jejich poměr, režim jízdy, používání příslušenství jako klimatizace či vytápění atd. Pro uživatele samotné je to výborný nástroj k uchovávání či sledování těchto dat a také k porovnávání dat s ostatními uživateli.

Vlastní výsledky

Řidič může vložit data o režimu provozu automobilu. Lze zadat procentuální poměr městského, mimoměstského a dálničního úseku, jež automobil na dané tankování urazil. Data o poměru provozu z posuzovaného souboru nejsou rozložena zcela rovnoměrně. Jak je uvedeno v grafu číslo 1, nejvíce zastoupeným provozem je dálniční provoz s 39 %, následuje městský s 33 % a nejméně mimoměstský s 28 %. Tento vyšší poměr dálničního provozu může být důsledkem velmi dobře rozvinuté dálniční sítě na území Německa, kde se i na kratší vzdálenosti řidič často dostane na dálnici. Dalším důsledkem vyššího poměru dálničního provozu může být o něco vyšší celková průměrná spotřeba, jelikož automobily s elektrickým pohonem mají zpravidla na dálničním úseku nejvyšší průměrnou spotřebu z těchto tří sledovaných provozů. Naopak v mimoměstském provozu obvykle dosahují nejlepších průměrných spotřeb. V případě sledování vlivu faktoru používání klimatizace a topení na celkovou spotřebu může být tento poměr ve prospěch menšího vlivu na spotřebu, jelikož v dálničním provozu

je nárůst spotřeby vlivem klimatizace a topení nejmenší.

Ze sledování dat průměrných spotřeb vyplývá, že vyšší průměrná spotřeba, tedy 1,18 kg H₂/100 km, byla zjištěna v zimním období (od 11. do 2. měsíce), tedy od listopadu do února. V letním období (od 3. do 10. měsíce) od března do října měla o 10,1 % menší hodnotu, tedy 1,06 H₂/100 km. Přehled jednotlivých měsíců je uveden v grafu č. 2. V přechodovém období (ve 4. a 9. měsíci) je průměrná spotřeba nejnižší, což může být zapříčiněno příznivou průměrnou teplotou v těchto měsících a pohodlím posádky vozidla bez nutnosti využívání energie na teplotní pohodu v kabině, tedy na provoz klimatizace nebo vytápění.

Jedním ze záznamů, který může řidič vložit do databáze Spritmonitor.de, je zadat používání klimatizace či vytápění. Průměrná spotřeba bez vytápění nebo klimatizace je 1,08 kg vodíku na sto kilometrů a se zapnutou klimatizací nebo vytápěním je průměrná spotřeba 1,13 kg vodíku na sto kilometrů, tedy rozdíl 0,05 kg vodíku, respektive navýšení spotřeby o 4,1 %. Pokud tento rozdíl ve spotřebě převedeme na celkovou udávanou dojezdovou vzdálenost na jednu plnou nádrž (650 km), při používání klimatizace nebo topení klesne dojezd o 30 km na dojezdovou vzdálenost 620 km. K velmi podobnému výsledku dospěli v zahraniční studii, ve které uvádějí průměrný rozdíl ve spotřebě 5 %. Zároveň dospěli k výsledku, že průměrný přírůstek spotřeby vodíku je 0,96 % na jednoho průměrného 75 kg vážícího cestujícího.²

Diskuse

- Poměrně důležitou poznámkou je fakt, že Německo má mírné a vlhké podnebí, kdy v letním období jsou průměrné teploty kolem 20 °C a v zimním období kolem 2 °C. Pokud tedy chceme zajistit pohodlí posádky a zahřát nebo zchladit kabinu auta na teplotu 21 °C, teplotní rozdíl vzduchu v kabině a v okolí je větší v zimním období a tím

i větší spotřeba elektrické energie pro dosažení pohodlné teploty v kabině automobilu. Palivový článek s polymerní membránou (PEM) v FCEV má však celkovou energetickou účinnost kolem 60 %, což znamená, že vyrábí i odpadní teplo. Na každých vyrobených 60 kW elektrické energie připadá také 40 kW tepla. Toto teplo lze vhodným teplotním managementem použít k zahřátí kabiny vozidla. Bateriová elektrická vozidla musí naprostou většinu tepla využitého k vytápění kabiny vyrobit z elektrické energie uložené v bateriích.

- Celková průměrná spotřeba vozidla za všechna období celého sledovaného souboru dat má hodnotu 1,1 kg vodíku na sto kilometrů. Například Toyota Mirai 2. generace má maximální kapacitu nádrže na 5,6 kg vodíku. Celkový objem tří vodíkových nádrží je 141 litrů, a uchovávají plynný vodík pod tlakem 70 MPa. Reálný dojezd, se zjištěnou průměrnou spotřebou, se tedy může pohybovat lehce nad 500 km. Údaje průměrné spotřeby od výrobců se liší o více než deset procent, v případě Toyoty o více než dvacet procent. U Toyoty, která udává průměrnou spotřebu 0,89 kg vodíku na sto kilometrů dle cyklu WLTP, se spotřeba liší, respektive je nižší proti skutečnosti o 23,6 procenta a Hyundai, který udával průměrnou spotřebu 0,95 kg na sto kilometrů dle cyklu WLTP, dosáhl ve skutečnosti vyšší spotřeby o 15,8 %.

- V článku byl analyzován vliv používání klimatizace/topení na spotřebu vodíku. Průměrný přírůstek spotřeby je 0,05 kg vodíku na sto kilometrů, respektive nárůst o 4,1 %. Pokud tuto hodnotu porovnáme s bateriovým elektromobilem, nárůst dojezdu bateriového elektromobilu s vypnutou klimatizací je o 8,75 % vyšší a v případě vypnutého topení až o 25 %.³ Důvodem je nutnost výroby tepla z elektrické energie uložené v baterii. Oproti tomu při jízdě palivový článek PEM generuje současně s výrobou elektrické energie z vodíku dostatek tepla k udržení teploty v kabině 25 °C při okolní teplotě 7 °C, tedy rozdíl 18 °C. Například u Toyoty Mirai 1. generace je doba zahřátí automobilu z -20 °C a zchlazení z +60 °C na stabilní teplotu +20 °C, respektive změna teploty o 40 °C, otázkou přibližně 25 až 30 minut, dále probíhá již jen udržování této teploty.⁴

- Pro srovnání lze uvést i rozdíl spotřeby paliva při zapnuté klimatizaci u automobilu se spalovacím motorem, který má účinnost mezi 25 % až 40 %. Ta nám udává,



Vodíková infrastruktura se pomalu začíná rozvíjet i na našem území (na snímku vozidlo Hyundai Nexo)

Foto archiv/Hyundai

kolik chemické energie paliva se přemění na mechanickou práci. Společnost ADAC v testu zjistila, že u spalovacích motorů se předpokládá průměrný nárůst 13,7 % spotřeby paliva se zapnutou klimatizací.⁵ Důležité je, že se jedná o průměrnou hodnotu. Protože nárůst spotřeby paliva vlivem klimatizace ve městě se může blížit až ke 20 % a naopak na dálnici může klesnout až k 7 %. Topení v osobních automobilech se spalovacím motorem je v naprosté většině případů zajištěno z tepla vyprodukovaného motorem, a výrazný vliv na spotřebu tak nemají. Výjimkou může být nezávislé elektrické topení, které obsahují některé příplatkové vybavy nebo jej lze dodatečně do automobilu namontovat.

- Vodíkový palivový článok vyžaduje pomalou dynamiku zatížení, aby si zachoval co největší životnost. Proto se přidává energetická rezerva, zejména baterie, a u některých modelů superkondenzátor. Zásadní rozdíl mezi oběma zařízeními je ve fyzikální podstatě, jakou obě zařízení využívají pro uchování energie. Baterie ukládají energii formou chemické vazby v elektricky neutrálních molekulách. Oproti tomu superkondenzátory využívají vzájemné působení sil mezi elektricky nabitými částicemi, kde je energie uskladněna ve formě elektrického náboje (elektricky nabitých částic). Tato úložiště elektrické energie mají za úkol vyrovnávat rozdíl mezi palivovým článkem a žádaným výkonem elektrické energie vozidla. Například Toyota Mirai druhé generace využívá lithium-iontovou baterii o kapacitě 1,2 kWh. To je dostatek energie pro ujetí zhruba 5 až 10 km. Superkondenzátor optimalizuje celý systém a dodává energii především v situacích, kdy je potřeba rychlé akcelerace, tedy velkého požadavku na výdej elektrické energie do systému. Superkondenzátory tedy nepředstavují u FCEV alternativu k bate-

riím, ale vhodnější je nahlížet na ně jako na doplněk, který napomáhá k optimalizaci energetického managementu.⁶

Závěr

Zatímco se zdá, že vodík není vnímán jako hlavní palivo osobní dopravy budoucnosti, bateriová elektrická vozidla naopak dostávají mnoho pozornosti. I přesto se na našem území pomalu začíná rozvíjet vodíková infrastruktura. Zkušenosti z praktického provozu vodíkových automobilů jsou zatím ojedinělé. Z dosavadních poznatků s dojezdem bateriových vozidel by mohla obdobně nastat obava z provozování automobilů s vodíkovými palivovými články. Kvantitativní analýza faktorů ovlivňujících spotřebu může přispět k odstranění této bariéry a pomoci při rozvoji vodíkových technologií pohonu. Tento článek si dal za cíl určit rozdíl mezi reálnou spotřebou a spotřebou udávanou výrobcem. Zjistit, jak se liší reálná spotřeba dle měsíců a ročního období. Dále porovnat ovlivnění spotřeby paliva jednotlivých pohonů a jejich citlivost na faktory ovlivňující spotřebu, respektive dojezd automobilu.

Ze sledovaných dat byl u automobilů s vodíkovým palivovým článkem zjištěn 10,1% nárůst spotřeby v zimním období oproti letnímu období, nejmenší průměrná spotřeba byla v přechodových měsících duben a září. Při používání klimatizace nebo topení byl zaznamenán nárůst spotřeby vodíku o 4,1 %. Z porovnání jednotlivých pohonů je zřejmé, že nárůst spotřeby vlivem používání klimatizace nebo topení je nejmenší právě u vodíkového pohonu. Průměrné udávané spotřeby výrobců se zdají být podhodnocené oproti reálným spotřebám uživatelů vozidel v provozu. Celková průměrná spotřeba vodíku sledovaného souboru dat byla 1,1 kg H₂/100 km. V při-

padě značky Toyota je průměrná spotřeba podhodnocena o 23,6 % a v případě značky Hyundai o 15,8 %.

[Recenzovaný článek byl vytvořen za finanční podpory Ministerstva dopravy v rámci programu dlouhodobého koncepčního rozvoje výzkumných organizací].

**Ing. Adam Poul,
Ing. et Ing. Libor Špička,
Centrum dopravního
výzkumu, v. v. i.**

Seznam literatury:

- ¹MOCK, Peter, John GERMAN a Anup BANDIVADEKAR. From laboratory to road: A comparison of official and 'real-world' fuel consumption and CO₂ values for cars in Europe and the United States [online]. 2013. Washington DC: THE ICCT, +1 202 534 1600, communications@theicct.org. I. Dostupné také z: https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_LabToRoad_20130527.pdf
- ²PINO, Francisco Javier, David MARCOS, Carlos BORDONS a Felipe ROSA. Car air-conditioning considerations on hydrogen consumption in fuel cell and driving limitations [online]. 15.2.2015, Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2015.04.079
- ³KAMBLY, Kiran a Thomas H. BRADLEY. Geographical and temporal differences in electric vehicle range due to cabin conditioning energy consumption [online]. 11.10.2014, Dostupné z: doi:10.1016/j.jpowsour.2014.10.142
- ⁴LOHSE-BUSCH, Henning, Kevin STUTENBERG, Michael DUOBA, et al. Automotive fuel cell stack and system efficiency and fuel consumption based on vehicle testing on a chassis dynamometer at minus 18 C to positive 35 C temperatures [online]. 12.10.2019, Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2019.10.150
- ⁵MOCK, Peter, John GERMAN, Anup BANDIVADEKAR a Iddo RIEMERSMA. International Council on Clean Transportation: Discrepancies between typeapproval and "real-world" fuelconsumption and CO₂ values [online]. Dostupné také z: https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_EU_fuelconsumption_workingpaper_2012.pdf
- ⁶CHANGIZIAN, Sina, Pouria Ahmadi AHMADI, Mehrdad RAEESI a Nader JAVANI. Performance optimization of hybrid hydrogen fuel cell-electric vehicles in real driving cycles [online]. 5.11.2019, Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2020.01.015