

Experimentální popis chování řídicí strategie hybridního vozidla

Bc. Jan Tesárek*, Ing. Vít Beránek, Ph.D.

ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel, Technická 4, 166 07 Praha 6, Česká republika

Abstrakt

Studie, provedená v rámci této práce, se zabývá rozhodnutím o příslušné řídicí strategii daného hybridního elektrického vozidla. Automobil, zapůjčený pro tuto studii, byl *Citroën DS5 HYbrid4*, používající hybridní systém *Through-the-Road*. Různými jízdními cykly bylo dosaženo výsledků, díky kterým je možno rozhodnout, že vozidlo používá tzv. *map-based* řídicí strategii.

Klíčová slova: hybridní elektrická vozidla; řídicí strategie

1. Úvod

Automobily, které používají ke svému pohybu více druhů pohonu, nazýváme hybridními. Spojení použitých pohonů vyžaduje velice složité řídicí systémy, které dokáží plně využít možnosti, nabízené hybridním ústrojím. Řídicí strategii nazýváme tu část systému, která je zodpovědná za přímé řízení pohonu vozidla. Strategie je založena na proměnných, mezi které patří například rychlost jízdy, výkonový požadavek, stav nabití baterie (*State of Charge*) a mnoho dalších. Automobilky se v poslední době zaměřují právě na možnosti optimalizace ovládacích strategií, jelikož jsou neustále nuceny ke snižování emisí motorových vozidel. Správně navržený a robustní systém by mohl snížit emise hybridních automobilů o mnoho procent, pokud by se dokázal rychle a správně přizpůsobovat okolním podmínkám.

Způsob, použitý pro zjištění řídicí strategie, je možné zařadit do kategorie tzv. *reverzního inženýrství*. Zkušební testy byly provedeny na válcové brzdě za pomoci Centra vozidel udržitelné mobility Josefa Božka se sídlem ve Vědeckotechnickém centru Roztoky. Data byla zaznamenána vlastním programem válcové brzdy a také diagnostickým programem, který získává informace ze standardního OBD-II konektoru, instalovaného v automobilu. [1]

2. Řídicí strategie

Řídicí strategii rozumíme systém, který rozhoduje, jakým způsobem by měly fungovat jednotlivé prvky hnacího řetězce, aby byl uspokojen požadavek na výkon s ohledem na celkovou energetickou účinnost vozidla. Hlavním cílem kontrolní strategie je zpravidla snížení celkové spotřeby energie, obvykle v přítomnosti různých omezení – například ovladatelnosti vozidla nebo omezení, vycházející z charakteru samotných prvků hnacího řetězce. [1]

3. Funkce HEV

Oproti konvenčním automobilům disponují hybridní vozidla několika dalšími funkcemi, které využívají hybridní systém. Automobily s hybridními pohony nemusí nutně obsahovat všechny tyto funkce.

Spolupráce obou druhů pohonu

Režim, kdy jsou v chodu oba motory (spalovací i elektrický) a společně pohánjí vozidlo při jízdě.

Elektrická jízda

Vozidlo se pohybuje pouze pomocí elektrického pohonu, s nulovými emisemi a téměř bezhlučně. Během této fáze je elektrická energie poskytována z baterií.

Power Assist/Boosting

Fáze, kdy automobil zrychluje za pomoci SM (spalovacího motoru) a elektromotoru. Při srovnání s konvenčním vozidlem je možné zvýšit akceleraci, elektromotor reaguje na řidičův požadavek téměř okamžitě a pokud je spalovací motor v automobilu vybaven turbodmychadlem, dokáže hybridní systém pokrýt dobu nutnou k dosažení potřebného plnicího tlaku turbodmychadla (tzv. *turbo lag*).

Funkce generátoru

V tomto módu operuje SM s vyšší zátěží a pouze část výkonu je použita k jízdě, zbylá část je využita k dobíjení akumulátoru. Tato funkce je preferována zejména při nízkém stavu nabití baterie.

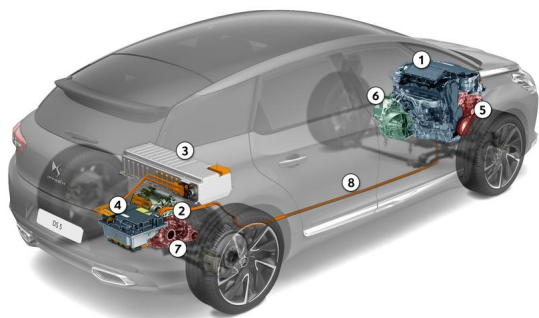
Rekuperace brzdě energie

Fáze rekuperace energie (její zpětné získávání) se spouští při brzdění vozidla. Elektrický systém pracuje jako generátor a získaná energie se ukládá do baterií. Tato funkce také pomáhá zabránit přehřívání brzdových kotoučů vozidla.

4. Testovaný automobil

Automobil, zapůjčený pro veškerá měření a testy, byl *Citroën DS5 HYbrid4*. Jedná se o pětimístné dvouprostorové vozidlo typu hatchback, jehož pohonný řetězec se skládá z naftového motoru 2.0 HDi o výkonu 120 kW (spojeného s šestistupňovou robotizovanou převodovkou), pohánějící přední nápravu a z asistované zadní nápravy, kde se nachází vysokonapěťový akumulátor s elektromotorem/generátorem o výkonu 27 kW. Vozidlo tedy využívá *Through-the-Road* hybridní systém, který je řízen elektronickou jednotkou, umístěnou v zadní části automobilu. Na obr. 1 je zobrazeno schéma automobilu, obr. 2 zobrazuje vozidlo při měření na válcové brzdě.

*Kontakt na autora: jan.tesarek@fs.cvut.cz



Obr. 1. Schéma pohonné řetězce automobilu Citroën DS5 HYbrid4: 1 – Vznětový motor HDi (pohon předních kol); 2 – Elektromotor (pohon zadních kol); 3 – Vysokonapěťový akumulátor; 4 – Elektronická řídicí jednotka výkonu; 5 – Reverzní alternátor (Stop & Start); 6 – Robotizovaná převodovka; 7 – Reduktor; 8 – Elektrické vedení [5]



Obr. 2. Vozidlo v průběhu testování na válcové brzdě

5. Použité jízdní testy

Základem měření byly standardní emisní cykly, jejichž vzájemným porovnáním získáme různá výkonostní zatížení pro testovaný automobil. Jednotlivé cykly se liší celkovým časem jízdy, maximální dosaženou rychlostí a z toho vyplývající celkovou ujetou vzdáleností (Tabulka 1). [2, 3, 4]

Tabulka 1. Porovnání jízdních cyklů

Cyklus	Vzdálenost [km]	Celkový čas [s]	v_{max} [km/h]
NEDC	10,931	1 180	120,1
WLTP	23,262	1 800	131,3
US06	12,894	596	129,2
JP 10-15	4,165	660	70,1
JC08	8,171	1 204	81,6

Výše uvedené jízdní cykly byly doplněny testem pružného zrychlení. Při tomto měření automobil zrychluje z určité rychlosti na daný rychlostní stupeň (viz Tabulka 2), přičemž rychlosti jsou voleny s ohledem na zpřevodování a výkon vozidla.

Tabulka 2. Test pružného zrychlení

Rychl. stupeň	Rychlost [km/h]			
3.	50-80	60-90	80-100	–
4.	50-80	60-90	80-100	90-120
5.	–	60-90	80-110	90-120
6.	–	–	80-110	90-120

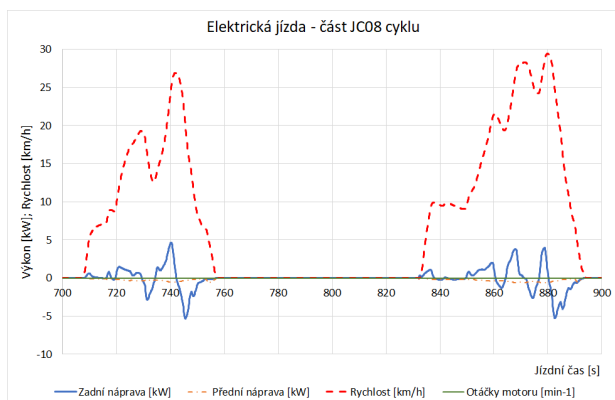
6. Popis řídicí strategie

Válcová zkušebna, kterou je vybavena laboratoř ve Vědeckotechnickém centru Roztoky, umožňuje přímé měření výkonu na jednotlivých kolech automobilu a tím pádem je možné přesně určit, jaký typ pohonu vozidlo využívá v daný okamžik – pokud tedy používá systém "Through-the-Road", jako v našem případě. O řídicí strategii bylo rozhodnuto z pohledu jednotlivých funkcí (viz kapitola 3), které se projevovaly v naměřených datech. K dodatečnému pozorování chování systému také přispěl fakt, že Citroën vybavil model DS5 propracovaným informačním systémem, a tak bylo možné pozorovat chování systému i na palubní desce automobilu. Systém, zodpovídající za přenos dat od elektrického pohonu k uživateli, dokáže v reálném čase (a s nízkou latencí) vypisovat na displej značné množství informací o aktuálním využití systému.

6.1. Elektrická jízda

Jak již bylo popsáno v kapitole 3, při této funkci je aktivní pouze elektrický systém pohonu hybridního vozidla (a tím pádem se vozidlo pohybuje s nulovými emisemi). Funkce bývá aktivní pouze do určité rychlosti (a současně při nízkém výkonovém požadavku). Podobné chování bylo pozorováno i na testovaném automobilu. Na obrázku 3 je zobrazena část jízdního cyklu JC08, ve které se automobil pohyboval pouze pomocí elektromotoru (v tomto cyklu je to oblast mezi cca 700 a 900 sekundami jízdního času).

Na ose y je vynesena výkon, použitý k pohybu automobilu; osa x představuje jízdní čas; datová čára modré barvy je výkon na zadní nápravě (elektromotor); datová čára oranžové barvy je výkon na přední nápravě (spalovací motor), nízké záporné hodnoty výkonu představují jízdní odpory předních kol; čára zelené barvy představuje průběh otáček SM; čára červené barvy je průběh rychlosti ve vybraném úseku jízdního cyklu. Jak můžeme pozorovat na datové čáře pro otáčky SM, pro jízdu v uvedené části cyklu nebyl spuštěn SM a pohyb automobilu závisí pouze na elektrickém pohonu. Zrychlení také není výrazné natolik, aby bylo nutné spuštění spalovacího motoru. Dále je na výkonové křivce elektromotoru patrné, že při snížení výkonového požadavku (nebo při brzdění) přechází motor do generátorického módu, pomáhá tak ke zpomalení vozidla a zároveň rekuperuje energii zpět do baterií – automobil tak i při relativně nízkých rychlostech má snahu zpětně získat co možná nejvíce energie, aby se nadále mohl pohybovat v čistě elektrickém módu. SoC baterie se při elektrické jízdě razantně snižuje a dojezd pouze na elektrický pohon je podle údajů výrobce jen několik kilometrů (přesný údaj není dostupný, záleží na podmínkách jízdy).



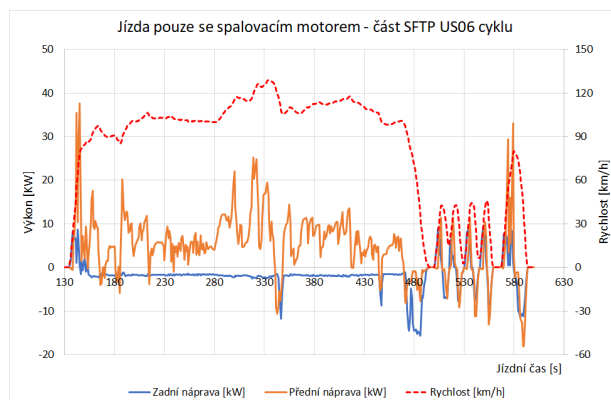
Obr. 3. Elektrická jízda – část JC08 cyklu

Z pohledu strategie řízení by se s největší pravděpodobností (dle chování automobilu) mohlo jednat o heuristický, *map-based* styl řízení, jelikož řídicí systém musí porovnat několik proměnných (rychlost vozidla, výkonový požadavek, otáčky motoru, různé teploty systémů, SoC). Po stránce optimalizace můžeme sledovat okamžitou snahu systému o dobití baterie (výkon na zadní nápravě v záporných hodnotách), aby jízda čistě na elektrickou energii mohla pokračovat co nejdéle. Bohužel to nejspíše nezahrnuje žádnou vlastnost prediktivního řízení a mohlo by docházet k přebíjení akumulátoru - po delším čase by se mohla rychle snížit jeho kapacita. Naneštěstí není možné ohledně predikce přijít s přesnými výsledky, v laboratorních podmínkách není možné realizovat situaci, při které by se automobil pohyboval, tudíž potřebné informace z GPS o trase nejsou řídicímu systému dostupné.

6.2. Jízda pouze se spalovacím motorem

Zjednodušeně můžeme tento jízdní režim nazvat jako opak předchozí funkce. Na pohonu automobilu se podílí pouze spalovací motor, samotný elektromotor do jízdy žádným způsobem nezasahuje. Grafické vyjádření projevu této funkce (obrázek 4) je nejlépe patrné z dat, která byla naměřena v cyklu SFTP US06. Tento cyklus by měl představovat agresivní jízdu s vysokou dosaženou rychlostí, která je udržována po dobu zhruba třicetipadesáti sekund.

Z grafu, který je uveden na obrázku 4 (vybraná oblast mezi 130 – 600 s jízdního času testu US06) jsme schopni na výkonových křivkách přesně pozorovat, že ve vyšších rychlostech je použit k pohonu pouze spalovací motor, pohánějící přední nápravu. Elektromotor na zadní nápravě je v této situaci vypnut (pokles datové čáry pod nulové hodnoty charakterizuje pouze jízdní odpor, případně rekuperaci při brzdění). Omezení použití elektromotoru ve vysokých rychlostech je závislé na jeho konstrukci – jedná se o střídavý synchronní motor, jehož maximální otáčky jsou omezené a také při překročení maximálního momentu by došlo k výpadku ze synchronismu a zastavení motoru (poruchový stav doprovázený proudovými a momentovými rázy).



Obr. 4. Jízda pouze se spalovacím motorem - část SFTP US06 cyklu

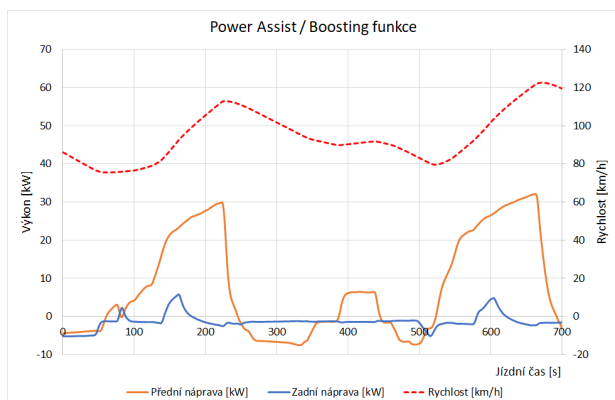
Řídicí strategie se při této funkci projevuje obdobně, jako v předchozí situaci. Elektronická jednotka, řídicí chování systému, porovnává hodnoty několika proměnných a následně rozhodne o odpojení pohonu zadní nápravy. Rychlost vozu a výkonový požadavek, jakožto dvě hlavní proměnné, kterými se strategie řídí v tomto případě, nejsou hodnoty jednoduše aplikovatelné do podmínek. Těchto dat by bylo velké množství a mohla by vzniknout velká časová prodleva v řízení (pokud přihlídneme k výpočetnímu výkonu elektronické řídicí jednotky), proto tato funkce zapadá do *map-based* strategie, kde se pouze jednoduchým porovnáním hodnot určí pozice proměnných v mapě a následně se dle této pozice rozhodne o dalším řízení systému. Optimalizace řídicí strategie nejspíše sleduje předchozí a současné jízdní podmínky, protože v závěru testu US06 (500 – 600 s jízdního času) docházelo při téměř totožném průběhu rychlosti testu k postupnému oddalování spuštění spalovacího motoru.

6.3. Spolupráce obou druhů pohonu

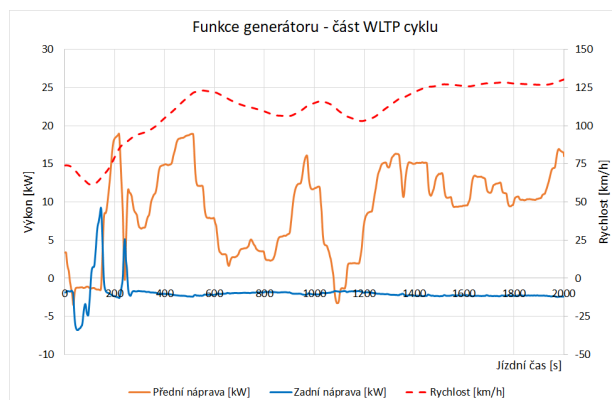
6.3.1. Funkce Power Assist / Boosting

Jedna z funkcí hybridního elektrického automobilu, při které jsou využívány oba druhy pohonu automobilu současně – základní myšlenka je popsána ve třetí kapitole. V zásadě by v power assist módu měl automobil dosahovat nejvyššího možného zrychlení a k aktivaci by mělo docházet pouze při velmi vysokém výkonovém požadavku. Funkci se podařilo aktivovat pouze při závěrečném testování pružného zrychlení a za poměrně zvláštních podmínek – bylo simulováno brzdění vozidla a následně rychlé sešlápnutí plynového pedálu. Systém tak musel reagovat na náhlou změnu řídicího požadavku a pro co nejvyšší zrychlení právě využil funkci power assistu. V ostatních testovacích cyklech se systém nedostal do podmínek, kdy by bylo nutné boosting využít. Nutno podotknout, že právě tento mód představuje nejvyšší mechanickou zátěž pro automobil, jelikož dochází k náhlému prudkému zrychlení a mohou vznikat velká nárazová zatížení jednotlivých mechanických součástí.

Graf na obrázku 5 (výňatek z testu pružného zrychlení) zobrazuje aktivaci power assist funkce. Na obou výkonových křivkách je patrné, že elektromotor a spalovací motor spolupracují při pohonu automobilu (obě křivky se nachází v kladných hodnotách).



Obr. 5. Funkce power assist v testu pružného zrychlení



Obr. 6. Funkce generátoru v části WLTP jízdního cyklu

Po zhodnocení všech znaků chování systému řízení se funkce power assistu projevuje obdobně jako předchozí funkce - v mapě řídicí strategie je vytvořena oblast, která odpovídá vysokému výkonovému požadavku a velkému zrychlení vozu. Aby ale vůbec došlo k aktivaci této funkce, je možné, že v řídicí strategii bude navíc zanesena podmínka, kterou je nutné splnit, aby ke spuštění power assistu vůbec došlo - tím by mohlo být skokové zvýšení výkonového požadavku.

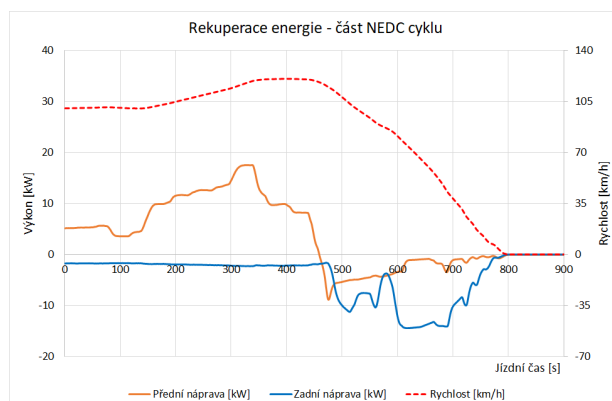
6.3.2. Funkce generátoru

Druhá vlastnost hybridního vozidla, při které jsou aktivní oba typy pohonu, je generátorová funkce (zjednodušeně *funkce dobíjení*). K aktivaci generátorového módu dochází zejména při delší jízdě ustálenou rychlostí, při které je spuštěný spalovací motor. Řídicí jednotka spalovacího motoru ve spolupráci s elektronickou jednotkou hybridního pohonu zjistí informaci, že se vozidlo již delší dobu pohybuje vyšší, ustálenou rychlostí, výkonový požadavek se téměř nemění a současně stav nabití baterie je nízký. Při této situaci je řídicí výkonový požadavek zvýšen, elektromotor se přepíná do generátorové funkce a rekuperuje energii do baterií právě hodnotou výkonu, která odpovídá zvýšenému požadavku na výkon u spalovacího motoru. Vlastnost se projevila například v cyklu WLTP, přesněji v jeho závěrečné části, která představuje jízdu po dálnici. Na obrázku 6 je graficky znázorněna právě uvedená část jízdního cyklu a bližším pohledem na průběh výkonových křivek můžeme zjistit, že na přední nápravě se výkon zvyšuje, zatímco na zadní nápravě klesá pod nulové hodnoty, přesně podle definice funkce.

Strategie řízení je obdobná jako v případě power assistu, pouze řídicí jednotka místo výkonového požadavku sleduje dobu trvání jízdy ustálenou rychlostí, zda je dostatečně dlouhá, aby mělo smysl funkci dobíjení aktivovat. Optimalizace této funkce byla uskutečněna nejspíše pouze v *offline* režimu - WLTP cyklus byl několikrát opakován (s velice podobnými počátečními hodnotami *SoC*). Pokaždé se však tato vlastnost projevila téměř identicky, hodnoty výkonu, kterými byly dobíjeny baterie, se lišily v řádu desetin kilowatt, tudíž se žádné úpravy samotné strategie přímo v automobilu nejspíše neodehrávaly.

6.4. Rekuperace

Funkce rekuperace energie je klíčovou vlastností hybridního vozidla, zjednodušeně ji lze definovat jako *proces přeměny kinetické energie vozidla zpět na energii elektrickou*. Rekuperace energie se projevila v každém měřeném testu, nejlépe čitelné grafické vyjádření (obrázek 7.5) vychází z New European Driving Cycle, přesněji z EUDC závěrečné části, kde vozidlo zpomaluje ze 120 km/h až do úplného zastavení. V okamžiku, kdy vozidlo začíná zpomalovat (a brzdit), bylo naměřeno na zadních kolech až -15 kW výkonu (záporná hodnota vyjadřuje zpomalování vozidla/rekuperaci).



Obr. 7. Rekuperace energie v NEDC cyklu

Pro zpětné získávání energie není nutné v řídicí strategii modelovat složité oblasti, jako je tomu u předchozích funkcí. Jedná se pouze o jednoduchou podmínkovou (*rule-based*) funkci; elektronická řídicí jednotka zjistí, že automobil jede na volnoběh/je sešlápnut pedál brzdy, *SoC* baterie je nízký a elektromotor ihned reaguje přepnutím do módu generátoru. Z hlediska optimalizace byly pozorovány různé výkony generátoru ve stejných testech (při velice podobném stylu jízdy), tudíž můžeme konstatovat, že se řídicí strategie snaží přizpůsobit pomocí předchozích jízdních podmínek - při opakování testu NEDC s podobným stavem nabití baterie bylo dobíjeno větší množství energie, jelikož v tomto cyklu se automobil většinou pohybuje pouze v elektrickém módu.

7. Celkové hodnocení řídicí strategie

Po závěrečném zhodnocení a porovnání veškerých vlastností, kterými se projevila řídicí strategie testovaného automobilu *Citroën DS5 HYbrid4*, dojdeme k závěru, že se s největší pravděpodobností jedná o *heuristickou strategii typu map-based*.

Řídicí strategie tohoto typu funguje na bázi oblastí (map), uložených v elektronické řídicí jednotce – porovnáním proměnných s uloženými daty se systém rozhodne, v jaké oblasti se vozidlo pohybuje a podle těchto informací upravuje chování řídicí strategie.

Mezi vstupní parametry, podle kterých se řídicí systém rozhoduje, patří zejména výkonový požadavek, rychlost vozidla a stav nabití baterie. Mezi doplňkové parametry mohou být zařazeny teploty veškerých systémů (např. motoru, baterií, katalyzátoru). Ze zmíněných parametrů je utvořeno několik map, ze kterých následně do systému vstupuje tzv. "*torque split ratio*", což v překladu znamená *rozdělení točivého momentu* a také rozhodnutí o zařazení vybraného rychlostního stupně.

8. Závěr

Vozidlo *Citroën DS5 HYbrid4*, které jsme měli k dispozici, používá hybridní systém typu *Through-the-Road*. K řízení pohonu využívá heuristickou řídicí strategii, založenou na mapovém základu. Tato mapa je dále upravována různými metodami optimalizace, mezi které patří zejména *online* úprava strategie pomocí předchozích a současných jízdních podmínek. Jelikož nebyla prováděna žádná měření mimo laboratoř (z toho důvodu, že za jízdy bychom se nemohli dostat k potřebnému množství informací), nemůžeme přesněji zjistit možnosti optimalizace, týkající se zejména prediktivního řízení.

Naměřená data, kterých bylo velké množství, by mohla být dále využita k simulacím kompletních řídicích systémů a také k modelování map, které jsou uloženy v řídicí jednotce hybridního ústrojí.

Použité zkratky

HEV	hybridní elektrické vozidlo
SoC	"State of Charge" – stav nabití baterie
SM	spalovací motor
JC08	Japanese JC08 Cycle
JP10-15	Japanese 10-15 Mode
NEDC	New European Driving Cycle
US06	US06 Supplemental Federal Test
WLTP	Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure Class 3 Cycle

Literatura

- [1] LINO, Guzzela and SCIARETTA, Antonio. *Vehicle propulsion systems: introduction to modeling and optimization*. 3rd ed. Heidelberg: Springer-Verlag, 2013. ISBN 978-364-2359-132.
- [2] BARLOW, T.J. *A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions*. 3rd ed. Wokingham: TRL Limited, 2009. ISBN 978-1-84608-816-2.
- [3] Emission Test Cycles: WLTC. *DieselNet: Diesel Emissions Online* [online]. [cit. 2018-02-02]. Dostupné z: <https://www.dieselnet.com/standards/cycles/wltp.php>
- [4] Emission Test Cycles: Japanese JC08 Cycle. *DieselNet: Diesel Emissions Online* [online]. [cit. 2018-02-02]. Dostupné z: https://www.dieselnet.com/standards/cycles/jp_jc08.php
- [5] DS5 - Hybrid Diesel Vehicle. *Citroen Cyprus: Auto and new car for sale* [online]. [cit. 2018-02-02]. Dostupné z: <http://www.citroen.com.cy/wp-content/uploads/2013/04/full-hybrid-citroen-ds5.jpg>