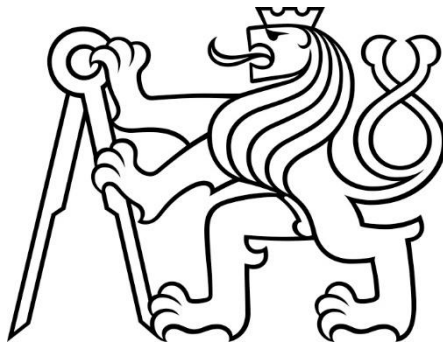


**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2017

**JAN
TESÁREK**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Tesárek** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **419583**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**
Studijní program: **Strojírenství**
Studijní obor: **Konstruování podporované počítačem**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Experimentální popis chování řídicí strategie hybridního vozidla

Název bakalářské práce anglicky:

Experimental description of control strategy of hybrid vehicle

Pokyny pro vypracování:

Zpracujte rešerši stávajících HEV řetězců. Zaměřte se na asistovanou zadní nápravu. S využitím laboratorního pracoviště proveďte experimentální popis chování hybridního vozidla za definovaných podmínek. Na základě zjištěných okolností proveďte analýzu použité strategie řízení.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Vít Beránek Ph.D., ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **19.04.2017** Termín odevzdání bakalářské práce: **12.07.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů.

V Praze dne 11. 7. 2017

Jan Tesárek

Poděkování

Rád bych touto cestou vyjádřil poděkování Ing. Vítu Beránkovi, Ph.D. za jeho cenné rady a trpělivost při vedení mé bakalářské práce. Rovněž bych chtěl poděkovat Ing. Vojtěchu Klírovi, Ph.D za vstřícnost a pomoc při získání potřebných experimentálních dat.

Mé poděkování patří též mé rodině a blízkým přátelům za pomoc a podporu během studia.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá rozhodnutím o řídicí strategii hybridního elektrického vozidla. V práci jsou uvedeny používané systémy pohonů hybridních vozidel, jejich funkce a základní popis řídicích strategií. Na základě naměřených dat jsou uvedeny vlastnosti, pozorované u měřeného vozidla, následně je rozhodnuto, jaký model strategie automobil používá k řízení hybridního systému.

Klíčová slova: hybridní elektrické vozidlo, řídicí strategie, optimalizace

Abstract

Bachelor thesis deals with decision on control strategy of hybrid electric vehicle. In this thesis, commonly used hybrid vehicle systems, their functions and basic principles of control strategies are described. Based on the measurements, features, which were observed in measured vehicle, are mentioned and finally, a decision about used control strategy is made.

Keywords: hybrid electric vehicle, control strategy, optimization

Obsah

Úvod	1
1 Hybridní elektrická vozidla	3
2 Systémy hybridních elektrických vozidel	4
2.1 Rozdělení podle uspořádání pohonu	4
2.2 Rozdělení podle stupně hybridizace	8
3 Funkce hybridních elektrických vozidel	9
4 Řídící strategie	10
4.1 Heuristické řídicí strategie	10
4.2 Optimální řídicí strategie	12
4.2.1 Offline optimalizace	12
4.2.2 Online (real-time) optimalizace	12
5 Testovaný automobil	14
6 Testy	15
6.1 New European Driving Cycle	15
6.2 Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure Class 3 Cycle	16
6.3 US06 Supplemental Federal Test	16
6.4 Japanese 10-15 Mode	17
6.5 Japanese JC08 Cycle	17
6.6 Test pružného zrychlení	18
7 Popis řídicí strategie	19
7.1 Elektrická jízda	20
7.2 Jízda pouze se spalovacím motorem	21
7.3 Spolupráce obou druhů pohonu	22
7.3.1 Funkce Power Assist / Boosting	22
7.3.2 Funkce generátoru	23
7.4 Rekuperace	24
8 Celkové hodnocení řídicí strategie	25
Závěr	26
Seznam obrázků	28
Seznam tabulek	29
Seznam příloh	30

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 strategií 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 přizpůsobovat okolním podmínkám.

Cílem bakalářské práce je popsat chování řídicí strategie použité testovaného vozidla; tento přístup patří do kategorie tzv. "reverzního inženýrství", což je *proces analýzy předmětného systému s cílem identifikovat komponenty systému a jejich vzájemné vazby* [1]. K rozhodnutí byla použita data, naměřená ve *Vědeckotechnickém centru Rožtoky* za pomoci *Centra vozidel udržitelné mobility Josefa Božka*.

Práce se skládá z teoretické a praktické části. V teoretické části jsou nejprve popsány používané systémy hybridních elektrických vozidel, dále funkce, které automobily s podobným pohonným systémem používají a také nejčastěji používané typy řídicích strategií včetně možností optimalizace. Praktická část se zaměřuje přímo na rozhodnutí o použité strategii na základě dat, naměřených na válcové zkušebně na automobilu *Citroën DS5 HYbrid4*.

Použité zkratky

HEV	”Hybrid Electric Vehicle” – 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
WLTC	Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure Class 3 Cycle

1 Hybridní elektrická vozidla

Hybridní elektrické vozidlo (zkráceně HEV) není – jak by se mohlo zdát – novinkou poslední doby. Ferdinand Porsche již v roce 1900 představil na světové výstavě v Paříži první prototyp hybridního automobilu, který je znám jako *Lohner-Porsche Semper Vivus* (obr. 1.1). V dnešní terminologii se jednalo o sériový hybrid, využívající dva jednoválcové motory (každý o výkonu 2,6 kW) a dva elektrické motory v kolech s výkonem 2 kW. Vozidlo bylo schopno dosáhnout rychlosti 35 km/h a ujet 200 km. [2]



Obrázek 1.1: *Lohner-Porsche Semper Vivus* [2]

Až do roku 1913 probíhaly obdobné – více či méně úspěšné – pokusy o vývoj a následný prodej hybridního vozidla. Bohužel se v roce 1913 v automobilech začíná objevovat startér (tak, jak jej známe dnes) a auta s benzinovými motory se stávají celkově uživatelsky přívětivější. Proto v těchto dobách zájem o hybridní vozidla upadá a tento stav přetrvává až do šedesátých let minulého století. V roce 1966 americký Kongres poprvé začíná doporučovat elektrická vozidla za účelem snižování znečištění ovzduší. S příchodem ropné krize v roce 1973 se zájem o „nové“ typy pohonu začíná zvyšovat a automobilky čím dál častěji přichází s novými návrhy hybridních vozidel. Přelom nastává až v roce 1997, kdy byla – o dva roky dříve než bylo původně v plánu – představena první generace *Toyoty Prius* (představení vozidla předchází klimatické konferenci v Kjótu v prosinci téhož roku). V domácím Japonsku slavila Toyota s tímto modelem úspěch, za prvních šest let bylo vyrobeno přes 60 tisíc vozů. Ve světě se spíše proslavila až druhá generace s označením XW20.

Od úspěchu značky Toyota se automobilky začaly mnohem více věnovat hybridním elektrickým vozidlům a v současnosti má hybridní model ve své nabídce skoro každá automobilka. Úspěch hybridů také tkví v tom, že v mnoha zemích jsou tato vozidla státem dotována, což je pro kupující velkým lákadlem k pořízení hybridního vozidla. V poslední době jsou tyto automobily také mnohem dostupnější a hybridní systémy nejsou výsadou jen „vlajkových lodí“ jednotlivých automobilek. Mnoho firem vidí v hybridech budoucnost, protože jsou státními regulacemi „nuceny“ ke snižování emisí; na druhou stranu, lidé zatím nemají v elektromobily důvěru (omezený dojezd, dlouhá doba nabíjení, vysoká pořizovací cena) – proto je cesta otevřena právě hybridním elektrickým vozidlům.

2 Systémy hybridních elektrických vozidel

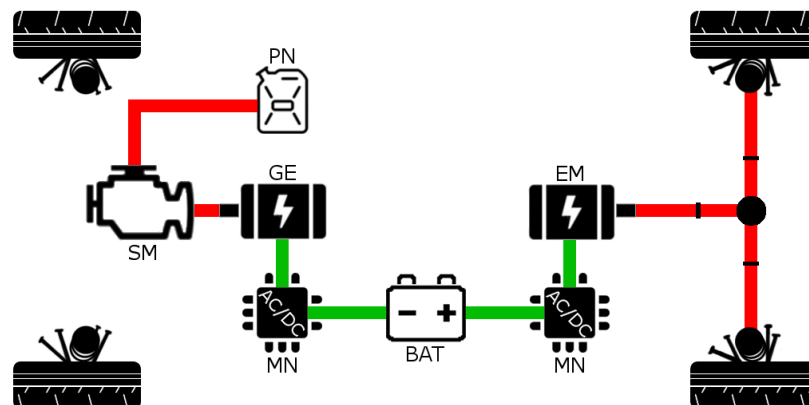
2.1 Rozdělení podle uspořádání pohonu

Prvním způsobem, kterým mohou být hybridní vozidla rozdělena, je dle uspořádání pohonu. Existují tři základní typy konfigurace – sériový, paralelní a kombinovaný hybrid.

Sériová hybridní vozidla

Hybridní vozidla se sériovým typem pohonu (obrázek 2.1) používají spalovací motor ke zvětšení dojezdu "čistě elektrického" vozidla. Motor není nijak napojen k hnacímu ústrojí, mechanická práce motoru je přeměněna generátorem na elektrinu, která může být přímo převedena do elektrického motoru (a využita k pohonu) nebo je použita k dobíjení baterií. Elektrickou energii můžeme rekuperovat použitím elektrického motoru jako generátoru a tato energie se ukládá v bateriích. Vozidlo se sériovým hybridním pohonem má tu výhodu, že spalovací motor není závislý na stylu jízdy, tudíž může stále pracovat v optimálním režimu – s vysokou účinností a nízkými emisemi.

Nevýhodou tohoto systému pohonu je nutnost použití nejméně třech zařízení – spalovacího motoru, generátoru a elektrického motoru. Sériové hybridy se mohou spotřebou vyrovnat současným vozidlům s vyspělými spalovacími motory, avšak přídatná zesílení karoserie, generátor a baterie mohou zvýšit celkovou hmotnost vozidla a tím pádem i celkovou spotřebu paliva. Z tohoto důvodu jsou právě nutné různé způsoby optimalizací pohonných řetězců. [3]



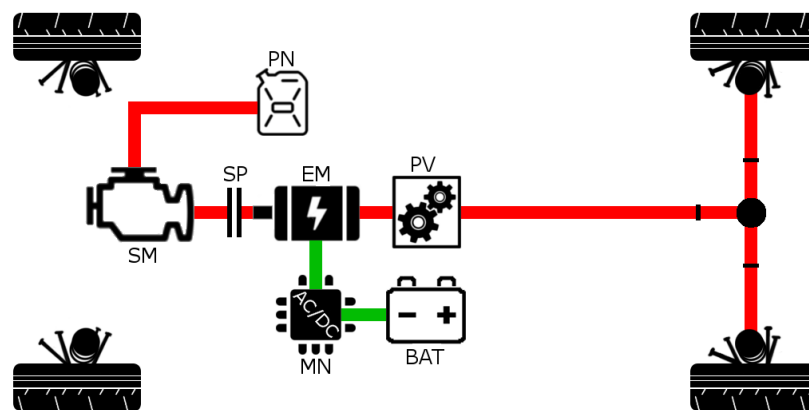
*BAT - baterie; EM - elektromotor; GE - generátor; MN - měnič; PN - palivová nádrž; SM - spalovací motor
červená barva - mechanické spojení; zelená barva - elektrické spojení*

Obrázek 2.1: Schéma sériového hybridního vozidla

Paralelní hybridní vozidla

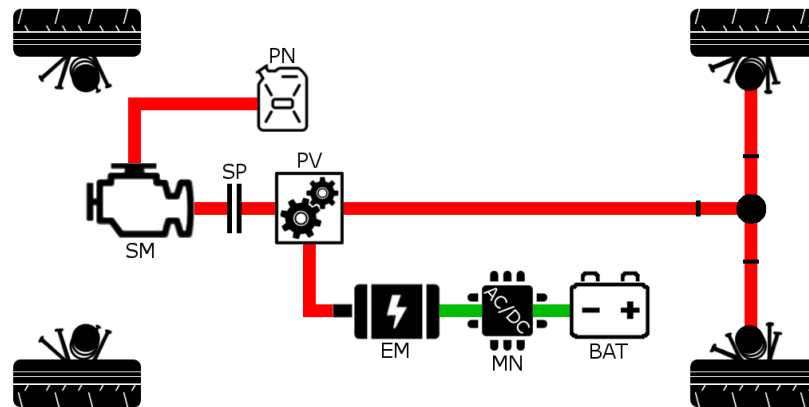
Pokud můžeme sériové hybridy nazvat jako "elektrická vozidla s přidaným spalovacím motorem", tak paralelní hybridy jsou spíše konvenční automobily s přidanou elektrickou větví. Ve vozidlech, vybavených paralelním hybridním systémem, může být k pohonu vozidla použit jak standardní spalovací motor, tak i elektrický pohonný systém. Elektromotor je také využit k dobíjení baterií – energii získává rekuperací kinetické energie vozidla nebo ze spalovacího motoru.

Vozidla, využívající tento typ systému, můžeme rozdělit na 3 typy, dle umístění elektrického pohonu. Často se celá elektrická soustava umísťuje mezi spalovací motor a převodovku, elektromotor má poté stejné otáčky jako převodovka – tzv. *single-shaft* (obrázek 2.2). Pokud je elektromotor umístěn stranou od převodovky, jeho otáčky mohou být měněny (možnost zástavby dalšího převodu) – odtud označení *double-shaft* (obrázek 2.3). Třetí možností jsou „*Through-the-Road/Double-Drive*“ hybridy, ve kterých jeden druh motoru pohání jednu nápravu. Jejich spojení je pouze "přes silnici", proto název "Through-the-Road" (obrázek 2.4). Tímto způsobem tedy vytvoříme vozidlo s pohonem všech kol, avšak bez mechanických prvků (diferenciálů, kardanových hřídelí a podobně). [3]



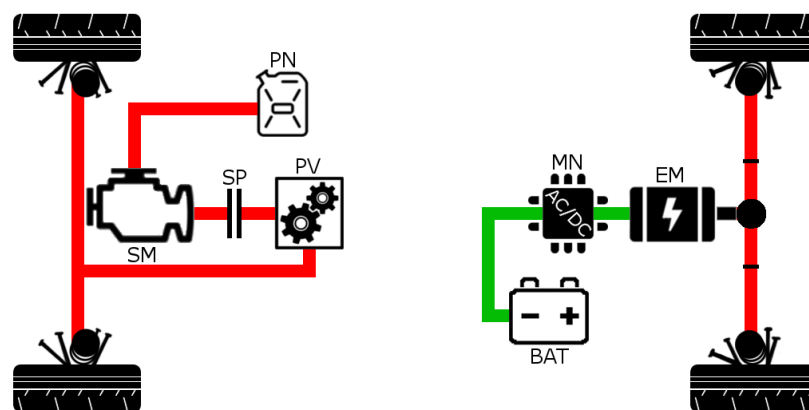
BAT - baterie; EM - elektromotor; MN - měnič; PN - palivová nádrž; PV - převodovka;
SM - spalovací motor; SP - spojka
červená barva - mechanické spojení; zelená barva - elektrické spojení

Obrázek 2.2: Schéma „single-shaft“ hybridního vozidla



*BAT - baterie; EM - elektromotor; MN - měnič; PN - palivová nádrž; PV - převodovka;
SM - spalovací motor; SP - spojka
červená barva - mechanické spojení; zelená barva - elektrické spojení*

Obrázek 2.3: Schéma „double-shaft“ hybridního vozidla

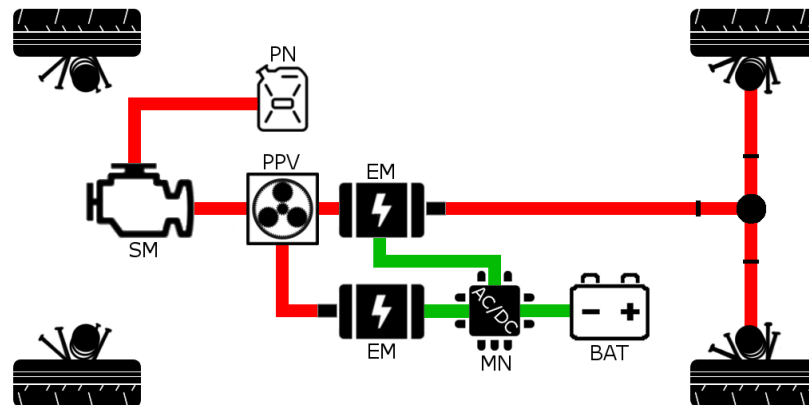


*BAT - baterie; EM - elektromotor; MN - měnič; PN - palivová nádrž; PV - převodovka;
SM - spalovací motor; SP - spojka
červená barva - mechanické spojení; zelená barva - elektrické spojení*

Obrázek 2.4: Schéma „Through-the-Road/Double-Drive“ hybridního vozidla

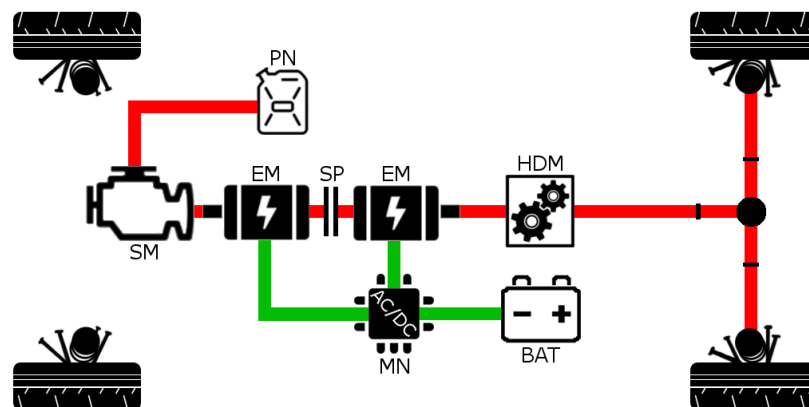
Kombinovaná hybridní vozidla

Hybridní vůz s kombinovaným pohonným řetězcem zapadá svým pojetím mezi dříve představené konfigurace HEV, jelikož kombinuje prvky paralelního a sériového hybridu. Využívá dvě odlišná elektrická zařízení – první je používáno jako elektromotor k pohonu (stejně jako v paralelním HEV) a druhé jako generátor elektrické energie (jako v sériovém HEV). První typ, také označován jako *power-split* (obrázek 2.5), využívá k usměrnění toku výkonu planetovou převodovku, druhý typ (viz obrázek 2.6) používá hydrodynamický měnič. [3]



*BAT - baterie; EM - elektromotor; MN - měnič; PN - palivová nádrž;
PPV - planetová převodovka; SM - spalovací motor
červená barva - mechanické spojení; zelená barva - elektrické spojení*

Obrázek 2.5: Schéma kombinovaného hybridního vozidla s planetovou převodovkou



*BAT - baterie; EM - elektromotor; HDM - hydrodynamický měnič; MN - měnič;
PN - palivová nádrž; SM - spalovací motor; SP - spojka
červená barva - mechanické spojení; zelená barva - elektrické spojení*

Obrázek 2.6: Schéma kombinovaného hybridního vozidla s hydrodynamickým měničem

2.2 Rozdělení podle stupně hybridizace

Druhým způsobem, jakým je možné rozdělit hybridní automobily, je dle stupně hybridizace. Ten může být vyjádřen jako poměr mezi elektrickým a celkovým instalovaným výkonem automobilu.

Mikro-hybridy

Vozidla, nazývaná jako mikro-hybridy, nejsou HEV v pravém slova smyslu. Můžeme tak označovat vozidla, vybavená start-stop systémem, který automaticky vypíná spalovací motor při zastavení automobilu (dle požadavku, systém lze vypnout tlačítkem na palubní desce).

Mild-hybridy

Mild-hybrid vozidlo je vybaveno větší elektrickou výbavou než mikro-hybrid, avšak ani tento pohon nepatří mezi tzv. full-hybridy, jelikož automobil není schopen jízdy pouze v čistě elektrickém režimu. V mild-hybridu nám elektromotor umožňuje vypnout spalovací motor při stání (stejný systém start-stop) a – oproti mikro-hybridu – můžeme při brzdění rekuperovat energii a následně ji uložit do baterie. Takto získanou energii lze použít při tzv. *power assistu*, kdy nám elektromotor pomůže k rychlejšímu rozjezdu nebo když potřebujeme krátkodobě zvýšit výkon (například při předjíždění).

Full-hybridy

Tento typ hybridního automobilu již plně využívá kombinace spalovacího motoru a elektromotoru. Oproti předchozím dvou typům, představeným výše, se může pohybovat čistě na elektrickou energii. Vozidla s tímto způsobem pohonu mohou být provozována v několika jízdních režimech, konkrétně:

- pohon spalovacím motorem;
- pouze elektrický pohon;
- spolupráce obou druhů pohonu;

Plug-in hybridní vozidla

Vozidla s označením *plug-in* jsou vozy s "nejvyšším stupněm" elektrické hybridizace. V porovnání s ostatními hybridy mají nejvyšší kapacitu baterií – to znamená, že jsou schopna ujet nejvíce kilometrů na čistě elektrický pohon. Zároveň také jako jediná umožňují nabíjení baterií z vnější elektrické sítě, tudíž nejsou závislá jen na vlastním pohonném systému.

Konstrukčně mohou plug-in HEV vycházet z dříve představených typů hybridních vozidel, jediným rozdílem je zvýšená kapacita instalované baterie a zabudování elektrické přípojky, díky které lze automobil nabíjet z elektrické sítě.

Elektrická energie je oproti tradičním uhlovodíkovým palivům mnohem levnější (není zatížena daní státu) a můžeme využít i levnějších tarifů mimo špičku (tzv. nízký tarif). V mnoha velkých městech jsou také dostupné nabíjecí stanice pro elektromobily/plug-in hybridy, kde si můžeme vozidlo nabít zdarma. V České republice navíc vytvořila skupina ČEZ projekt */E/mobilita* a vybudovala několik dobíjecích stanic (zejména na dálnicích), kde je možné dobíjet automobil.

3 Funkce hybridních elektrických vozidel

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 pohání 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 Řídící strategie

Řídící strategií rozumíme systém, rozhodující o tom, 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. Strategie, používané k řízení systémů HEV, můžeme rozdělit na *heuristické* a *optimální*. [3]

4.1 Heuristické řídicí strategie

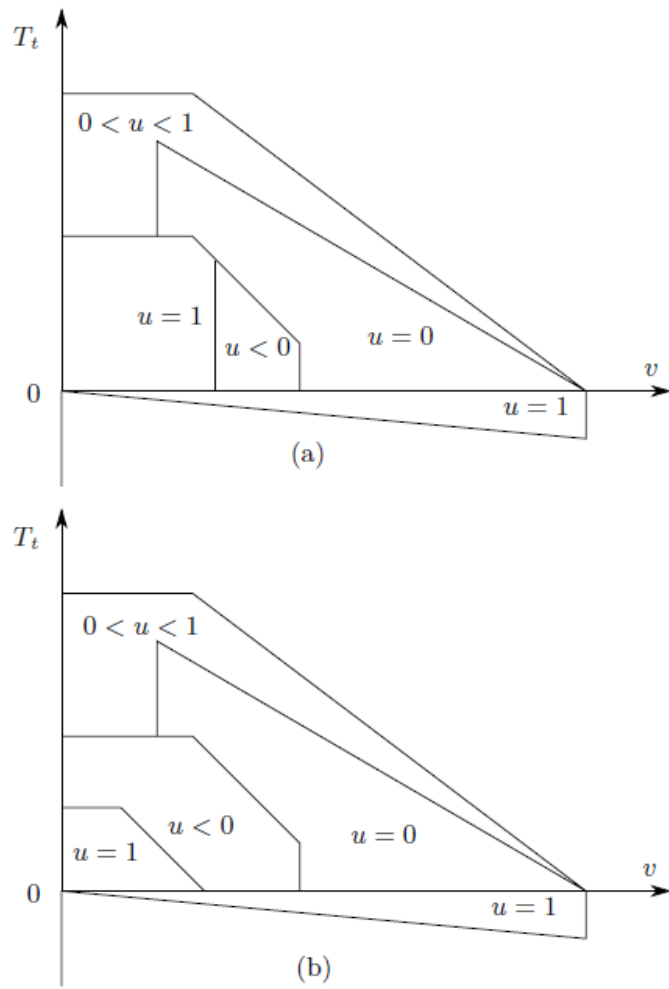
Heuristické strategie jsou založeny na intuitivních pravidlech a korelacích, zahrnujících různé vstupní proměnné. Jedním základním principem pro tento typ řízení je ten, že spalovací motor by měl pracovat pouze pokud je jeho účinnost (relativně) vysoká; v ostatních podmínkách by měl být preferován elektromotor. Navíc, pokud SM běží, měl by být provozován v oblastech s vysokou účinností – zpravidla při velkém zatížení. Abychom toho dosáhli, řidičův výkonový požadavek se částečně zvýší a tato část výkonu je využívána k dobíjení baterií.

Druhý princip heuristické řídicí strategie je založen na stavu nabití baterie (*State of Charge*, zkráceně *SoC*), který by se měl pohybovat v předem nastavených limitech. Pokud se *SoC* přibližuje k dolnímu limitu, aktivuje se dobíjecí mód; pokud stav nabití baterie překročí horní hranici, měl by být upřednostňován provoz na čistě elektrický pohon. Další podmínky mohou brát v potaz provozní teploty systému – zejména teplotu katalyzátoru (jenž musí mít určitou teplotu pro co nejvyšší účinnost) – za těchto podmínek by měl být v provozu spalovací motor. Také další příslušenství, která bývají napojena na SM – například klimatizace – mohou vyžadovat spuštěný spalovací motor.

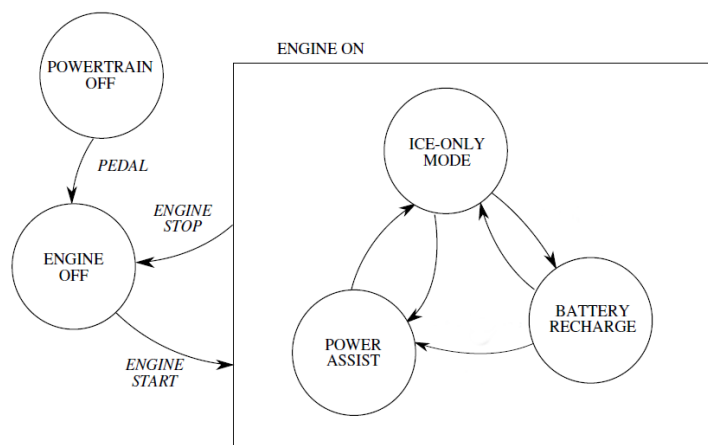
Implementace těchto dvou základních principů může být na základě *map* (*map-based*) nebo *pravidel* (*rule-based*). V *map-based* přístupu jsou ze vstupních proměnných (např. rozdělení točivého momentu mezi SM a elektromotor u a výkonový požadavek T_t) (obrázek 4.1), které využívá hybridní systém, vytvořeny *oblasti*. Hybridní systém při jízdě zjistí, v jakém *regionu* se proměnné nachází a podle jejich polohy rozhoduje o chování pohonného systému. Avšak při použití toho systému by měl být počet vstupních parametrů relativně nízký, aby bylo možné systém prakticky využít. Pro funkční a robustní systém by mezi vstupní proměnné měly (vedle proměnných, zobrazených na obrázku 4.1) patřit například otáčky a teplota motoru, teplota baterie a zrychlení vozidla.

V systémech, založených na pravidlech (*rule-based*), je řídicí strategie implementována jako konečný stavový automat (*finite state machine*) - viz obrázek 4.2. Pro tento přístup řízení jsou v konečném automatu přímo naprogramovány dva základní stavy – pouze elektrický mód a stav, kdy je SM v provozu (tento stav obsahuje i veškeré hybridní funkce, popsané v kapitole 3). Přejechy mezi těmito stavy proběhnou pouze za splnění určitých podmínek. Například pro aktivování čistě elektrického režimu je nutno splnit následující podmínky:

- rychlost vozidla a výkonový požadavek jsou nízké;
- teplota katalyzátoru je dostatečně vysoká;
- stav nabití baterie je dostatečný;
- není požadován provoz příslušenství připojených k motoru. [3]



Obrázek 4.1: Map-based řídicí strategie [3]



Obrázek 4.2: Rule-based řídicí strategie [3]

4.2 Optimální řídicí strategie

Optimalizace řídicí strategie může probíhat ve dvou úrovních - *offline* a *online*. V prvním případě je přesně znám jízdní cyklus, na který přímo nastavujeme chování hybridního systému vozidla. Bohužel v reálném provozu není možné znát přesnou trasu, kterou bude vozidlo přesně následovat (jistou výjimkou mohou být například vozidla MHD, která mají zadanou trasu linky, na které se zrovna pohybují). Proto je ve vozidlech nutný tzv. *online controller*, tedy zařízení, které upravuje systém řízení hybridního soustrojí v reálném čase.

4.2.1 Offline optimalizace

Offline optimalizací rozumíme dva hlavní přístupy - *statickou optimalizaci* a *dynamické programování*. Ve *statické optimalizaci*, která trvá od stovek po tisíce sekund, jsou prozkoumána veškerá možná řešení, aby byl nalezen optimální výsledek. Avšak tento přístup vyžaduje vysoké výpočetní výkony, proto se výpočty musí často redukovat pouze na několik proměnných a výsledky jsou použitelné pouze za určitých okolností.

Hlavní výhodou *dynamického programování* oproti *statické optimalizaci* je, že nalezené výsledky jsou *globálním optimálním řešením* a jsou více použitelné než u předchozího způsobu optimalizace. Další užitečná vlastnost spočívá v tom, že výpočtová náročnost narůstá s časem pouze lineárně. Při vhodně zvoleném počtu neznámých a délce trasy, dokáže systém ve vozidle tyto výpočty zvládat v přiměřeném čase. Výpočty také můžeme řešit iteracemi, kdy si zvolíme jen části, které bude systém řešit a čas, který potřebujeme k řešení těchto úloh, se výrazně zkrátí. [3]

4.2.2 Online (real-time) optimalizace

Pro uvedená *offline* řešení řídicích strategií je nutné znát budoucí podmínky a to velice ztěžuje jejich implementaci v systému. Pro následné získání informací pro systémy řízení se používá několika principů.

Prediktivní řízení

Největší množství informací je dostupné tehdy, kdy je celá trasa (a veškeré její podrobnosti) známa již před samotnou jízdou. Nicméně u osobních vozidel tuto možnost nemáme a odhad budoucích předpokladů trasy musí být vyhodnocen přímo při jízdě. Díky GPS navigaci a vyhodnocovací jednotce, přítomné ve vozidle, máme možnost na základě různých poznatků – například rychlost automobilu, nejvyšší povolená rychlost v daném místě, dopravní situace – odhadnout podmínky v nejbližší možné době a ihned upravit řídicí strategii. [3]

Time Invariant Feedback Controller

Jedná se o jednodušší způsob řízení využívající mapy "zpětných vazeb", ve které je hlavní řídicí proměnná tabelována jako funkce ostatních vstupních proměnných. Optimální řešení, nalezené pomocí dynamického programování, je statisticky analyzováno a realizovatelná pravidla řízení jsou použita ke konstrukci zpětnovazební mapy. Ke zjednodušení této mapy omezujeme počet vstupních parametrů na dva, například výkonový požadavek a SoC nebo výkonový požadavek a rychlost vozidla. Ačkoliv se tento způsob řízení se v HEV používá s úspěchem, je založen na specifickém cyklu a všeobecně není použitelný pro různé jiné cykly. [3]

Simulací ale bylo dokázáno, že *stochastickým* dynamickým programováním můžeme získat více odpovídající výsledky, které jsou přímo implementovatelné do řídicího systému. *Stochastické programování* (založené na teorii pravděpodobnosti) totiž nepracuje s přesnými informacemi, nýbrž s náhodnými veličinami, a proto výsledná data více odpovídají reálným situacím (ve kterých se taktéž mnoho veličin objevuje spíše náhodně). [7]

ECMS-Type Controller

Equivalent Consumption Minimization Strategy, zkráceně *EMCS*, je jedním z přístupů *online* optimalizace. Způsob *ECMS* optimalizace je založen na celkové energetické spotřebě HEV.

Předchozí jízdní podmínky

Optimální podmínky pro současnou trasu jsou vypočteny ze sady záznamů o jízdě, uložených v řídicí jednotce (které mohou obsahovat přes dvacet charakteristických parametrů, mezi ně patří například průměrná rychlost nebo čas stání vozidla). Informace, které jsou dostupné, jsou porovnávány se současnou situací a konfigurace, která se nejvíce blíží této situaci, je použita k řízení systému. [3]

Předchozí a současné jízdní podmínky

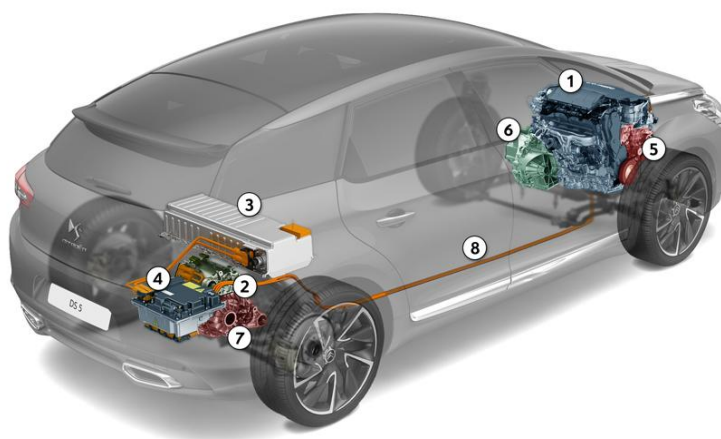
Tento systém používá předchozích podmínek (viz výše) a strategii zpřesňuje podle aktuální situace nebo podle momentálního stavu nabití baterie. V tomto systému jsou tedy některé proměnné upravitelné a pokud je zaznamenán pokles napětí baterie pod určitou mez, strategie rozhodne o zvýšení požadavku na výkon SM a baterii se snaží co nejrychleji dobít na předem určenou kapacitu. V opačném případě je upřednostňován elektrický mód. Tento princip se podobá jednomu ze způsobů heuristické strategie řízení (viz kapitola 4.2). [3]

Předchozí, současné a budoucí jízdní podmínky

Dva typy *ECMS* optimalizace, uvedené výše, již dokáží systém přiblížit skoro optimálním výsledkům, avšak byla objevena skutečnost, že strategie, které nejsou prediktivní, rekuperují více energie než je možno uložit do baterie – nepředpokládají totiž další fáze rekuperace v budoucnosti. V případě dobití baterie na maximální kapacitu se energie, která mohla být rekuperována při brzdění, disipuje v teplo. Proto v automobilech s nižší kapacitou akumulátoru je velice výhodné zahrnout do řízení hybridního systému některé funkce schopné předpovídat budoucí jízdní podmínky. Zjištění těchto podmínek je stejné jako u *prediktivního řízení*. [3]

5 Testovaný automobil

Automobilem, na kterém byla uskutečněna veškerá měření a testy, byl Citroen 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. Automobil tedy využívá "Through-the-Road" hybridní systém (viz kapitola 2.2; schéma viz obrázek 2.4). Systém hybridního pohonu je řízen elektronickou jednotkou, umístěnou v zadní části automobilu. Na obrázku 5.1 je zobrazeno schéma pohonného řetězce vozidla, obrázek 5.2 zobrazuje vozidlo při měření na válcové brzdě.



Obrázek 5.1: Schéma pohonného řetězce automobilu Citroen DS5 HYbrid4 [9]

Legenda: 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 – Šestistupňová robotizovaná převodovka; 7 – Reduktor; 8 – Elektrické vedení



Obrázek 5.2: Vozidlo v průběhu testování na válcové brzdě

6 Testy

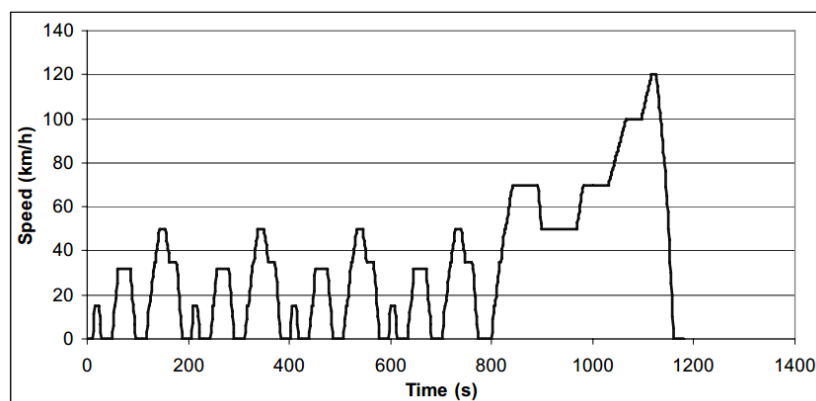
Základem měření byly standardní emisní cykly, jejichž vzájemným porovnáním získáme různá výkonnostní zatížení pro testovaný automobil. Jednotlivé cykly se liší celkovým časem jízdy, maximální dosaženou rychlostí a z toho vyplývající celkovou ujetou vzdáleností (tabulka 6.1). Data byla zaznamenána programem válcové brzdy a také diagnostickým programem VAG, který získává informace ze standardního OBD-II konektoru.

Tabulka 6.1: Porovnání jízdních cyklů [5]

Jízdní cyklus	Vzdálenost [km]	Celkový čas [s]	Maximální rychlost [km/h]
NEDC	10,931	1180	120,1
WLTP	23,262	1800	131,3
US06	12,894	596	129,2
JP 10-15	4,165	660	70,1
JC08	8,171	1204	81,6

6.1 New European Driving Cycle

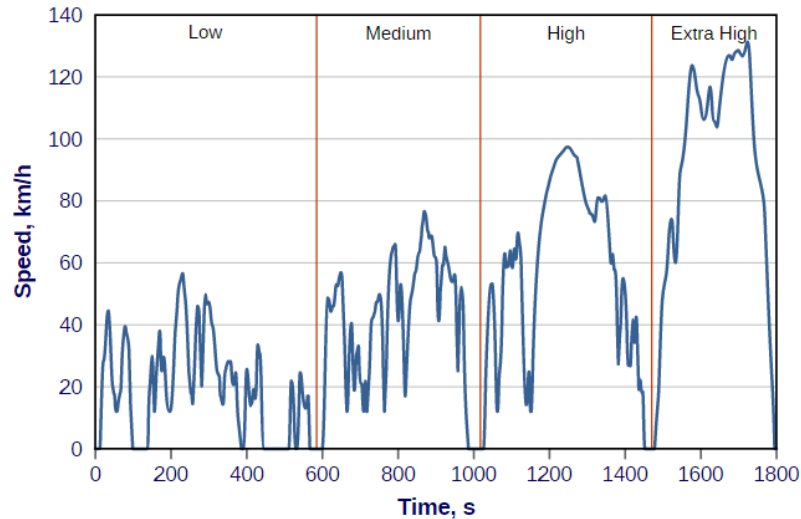
New European Driving Cycle, zkráceně NEDC (obrázek 6.1), byl zaveden v roce 1992 a do roku 2017 je hlavním homologačním testem pro automobily v Evropě. Skládá se ze čtyř opakování testu ECE-15 a jedné části EUDC. V letošním roce bude nahrazen cyklem Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle Class 3 (zkráceně WLTC, viz kapitola 6.2), protože byl shledán nedostatečným kvůli nízkému využití pohonu vozidla. Z měření poté plynou výsledky, které neodpovídají reálným jízdním podmínkám.



Obrázek 6.1: *New European Driving Cycle* [5]

6.2 Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure Class 3 Cycle

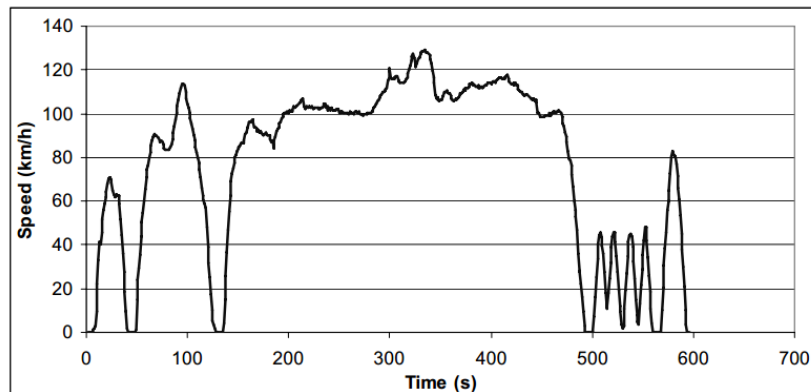
Jízdní test, který je součástí WLTP – Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure – nahrazuje cyklus NEDC. Class 3 test (viz obrázek 6.2) je určen pro vozidla, jejichž poměr výkon/hmotnost je větší než 34 kW na 1000 kg. Testovaný automobil spadá právě do této kategorie.



Obrázek 6.2: WLTP Class 3b Cycle [6]

6.3 US06 Supplemental Federal Test

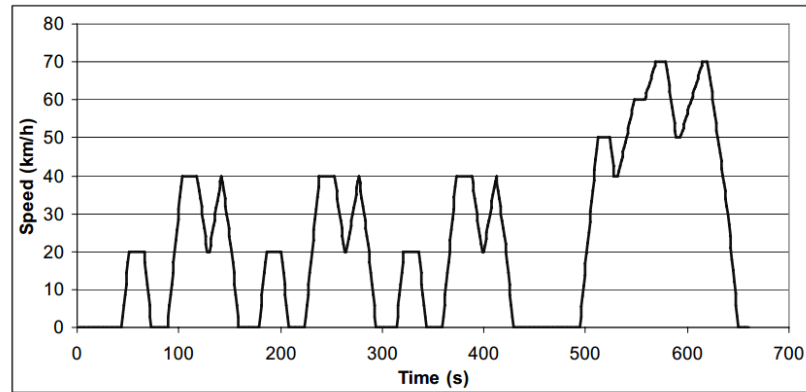
The US06 Supplemental Federal Test Procedure (obrázek 6.3) byl vytvořen pro kompenzaci nedostatků cyklu FTP-75 (Federal Test Procedure) a reprezentuje agresivní jízdu s velkým zrychlením a vysokou rychlostí. Od roku 2008 se jeho výsledky započítávají do hodnocení spotřeby vozidel v USA.



Obrázek 6.3: SFTP US06 Cycle [5]

6.4 Japanese 10-15 Mode

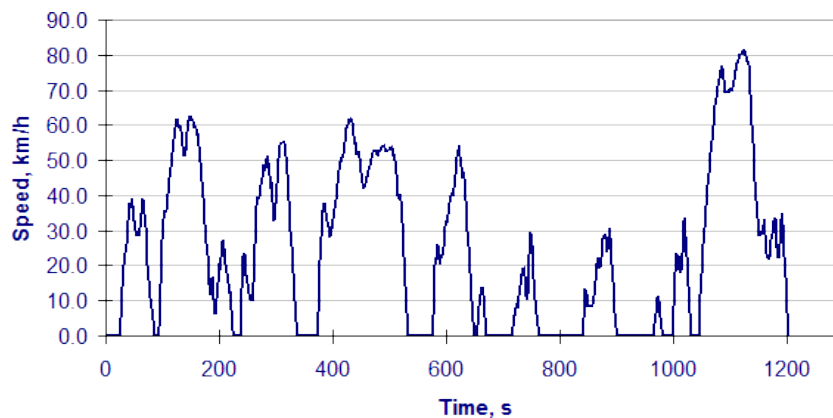
Cyklus 10-15 byl používán v Japonsku pro testování a homologaci osobních automobilů. V roce 2008 byl nahrazen cyklem JC08. Byl vytvořen ze tří "10-Mode" částí s maximální rychlostí 40 km/h a jednou "15-Mode" částí s maximální rychlostí 70 km/h (viz obrázek 6.4).



Obrázek 6.4: *Japanese 10-15 Mode* [5]

6.5 Japanese JC08 Cycle

V roce 2005 představila v Japonsku komise pro regulaci emisí test s názvem JC08 (obrázek 6.5). Cyklus reprezentuje jízdu v přeplněné městské dopravě, včetně dlouhých částí, kdy motor běží na volnobě a dále časté změny akcelerace a decelerace. Měření se opakuje dvakrát, jednou se studeným a podruhé s ohřátým motorem. Výsledné hodnoty jsou vypočítávány z váženého průměru studeného a teplého příspěvku.



Obrázek 6.5: *Japanese JC08 Cycle* [8]

6.6 Test pružného zrychlení

K výše uvedeným testovacím cyklům byl na závěr měření přidán test pružného zrychlení. Při tomto měření automobil zrychluje z určité rychlosti na daný rychlostní stupeň (viz tabulka 6.2), přičemž rychlosti jsou nastaveny s ohledem na převodování a výkon vozidla. Měření vyšších rychlostí postrádalo smysl, jelikož bylo zjištěno, že ve vysokých rychlostech není hybridní systém aktivní a automobil je poháněn pouze spalovacím motorem.

Tabulka 6.2: *Test pružnosti*

Rychlostní 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

7 Popis řídicí strategie

Díky možnostem měření, které jsou nabízeny laboratoří ve Vědeckotechnickém centru Roztoky, byl získán dostatek informací o chování vozidla za různých podmínek. Válcová brzda totiž 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 tomto případě. O řídicí strategii bylo rozhodnuto z pohledu jednotlivých funkcí, 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.

Prvním projevem řídicí strategie bylo spuštění samotného hybridního systému. Po stisknutí tlačítka na přístrojové desce byl ihned nastartován spalovací motor a ne jen samotná elektrická soustava systému (jako například u Toyoty C-HR). Po krátké době, kdy vozidlo pouze stálo, byl spalovací motor automaticky vypnut a aktivní byl pouze elektrický systém. Tento proces může být vysvětlen několika způsoby – k přípravě automobilu k jízdě a k zapnutí všech doplňkových systémů je třeba velké množství energie z akumulátoru – proto se ihned spustí i SM, aby tuto ztracenou energii ihned dobil pomocí alternátoru. Při prvním startu vozidla také spalovací motor běžel přibližně o třicet vteřin delší dobu než u následujících startů – tato skutečnost může být připsána nutnosti zahřátí katalyzátoru na provozní teplotu, která se pohybuje okolo 300 °C.

Chování vozidla bezprostředně po startu můžeme charakterizovat jako *rule-based* řízení, spadající mezi heuristické strategie (viz kapitola 4.1). Hybridní systém vozidla totiž reaguje na plnění podmínek, které nastávají po jeho startu – okamžité dobití akumulátoru spalovacím motorem a jeho následné vypnutí při zjištění informací, že automobil není v pohybu (a neobjevuje se ani žádný výkonový požadavek), teplota okolí je dostatečně vysoká (není nutné příliš zahřívat motor ani rychle vytápět vozidlo) a provozní teploty jsou v určitých mezích.

Při následujících měřeních, probíhajících na válcové brzdě, byly pozorovány následující vlastnosti/funkce hybridního systému:

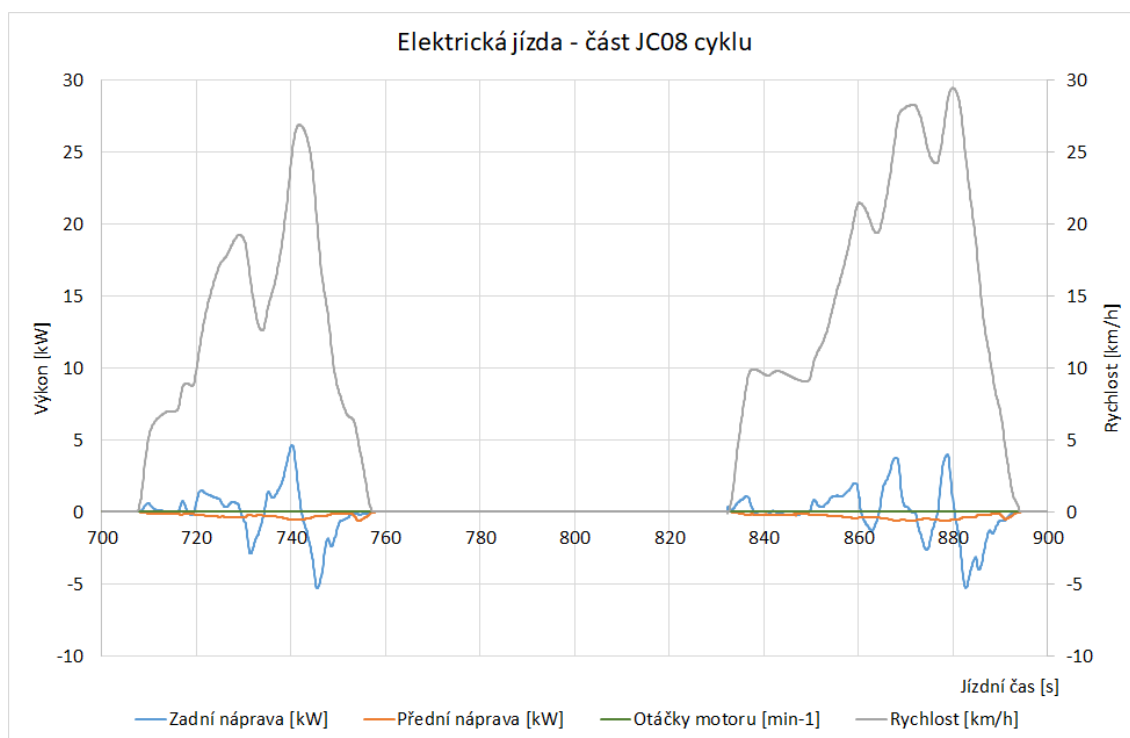
- čistě elektrická jízda;
- jízda pouze na spalovací motor;
- spolupráce obou druhů pohonu (power assist a funkce generátoru);
- rekuperace energie;

Zjednodušeně lze tvrdit, že se objevily veškeré funkce, které byly od full-hybridu očekávány.

7.1 Elektrická jízda

Jak již bylo popsáno v kapitole 3, při této funkci je aktivní pouze elektrický systém pohonu hybridního vozidla, které se v tomto případě pohybuje s nulovými emisemi. Funkce jízdy pouze na elektrickou energii bývá aktivní pouze do určité rychlosti a současně při nízkém výkonovém požadavku a podobné chování bylo pozorováno i na testovaném automobilu. Na obrázku 7.1 je graficky vyobrazena část jízdního cyklu Japanese JC08 (kap. 5.5), kde se automobil pohyboval jen pomocí elektromotoru (v JC08 cyklu tomu odpovídá vybraná část mezi cca 700 – 900 sekundami jízdního času). Uvedená část cyklu by měla představovat popojíždění po městě.

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 šedé 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).



Obrázek 7.1: Elektrická jízda v cyklu JC08

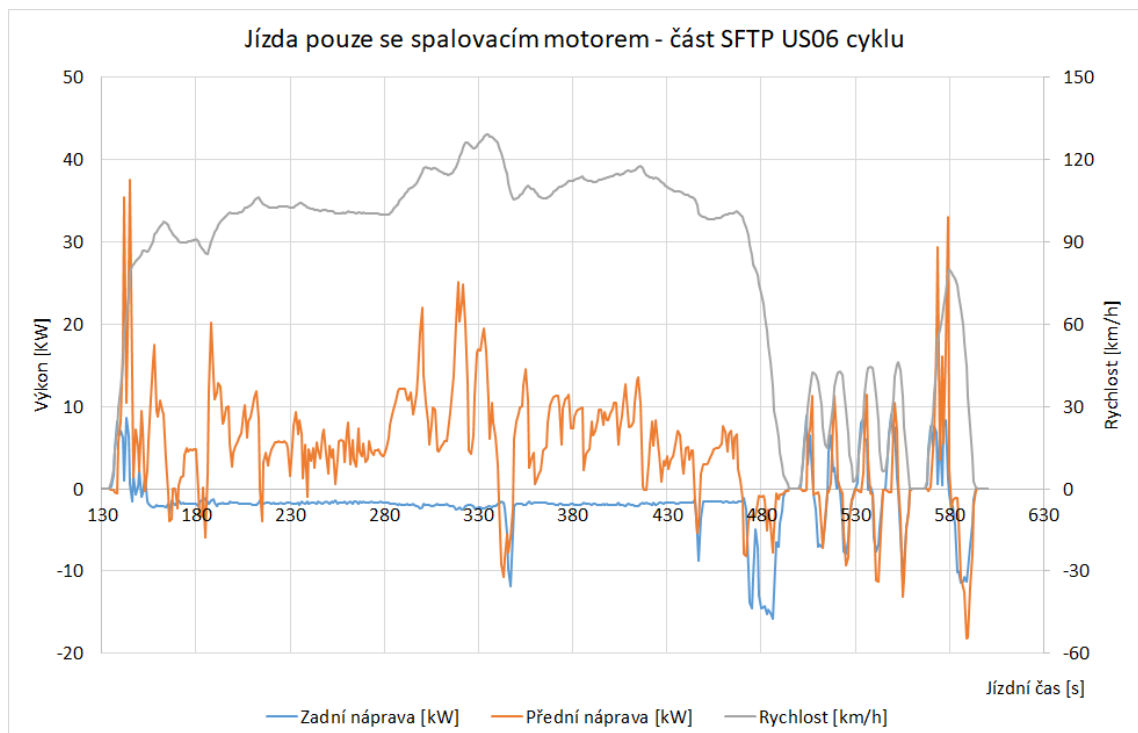
Z pohledu strategie řízení by se s největší pravděpodobností (dle chování automobilu) mohlo jednat o heuristický, *map-based* styl řízení (viz kapitola 4.1), jelikož řídicí systém musí porovnat několik proměnných (rychlost vozidla, výkonový požadavek, otáčky motoru, různé teploty systémů, *SoC*). Po stránce optimalizace můžeme sledovat okamžitou snahu

systemu o dobítí 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.

7.2 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 7.2) je nejlépe patrné z dat, která byla naměřena v cyklu SFTP US06 (kapitola 5.3). Jak již bylo uvedeno, US06 cyklus by měl představovat agresivní jízdu s vysokou dosaženou rychlostí, která je udržována po dobu zhruba třístapadesáti sekund.

Z grafu, který je uveden na obrázku 7.2 (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 (nad cca 100 km/h) je závislé na 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).



Obrázek 7.2: Jízda se spalovacím motorem v cyklu SFTP US06

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

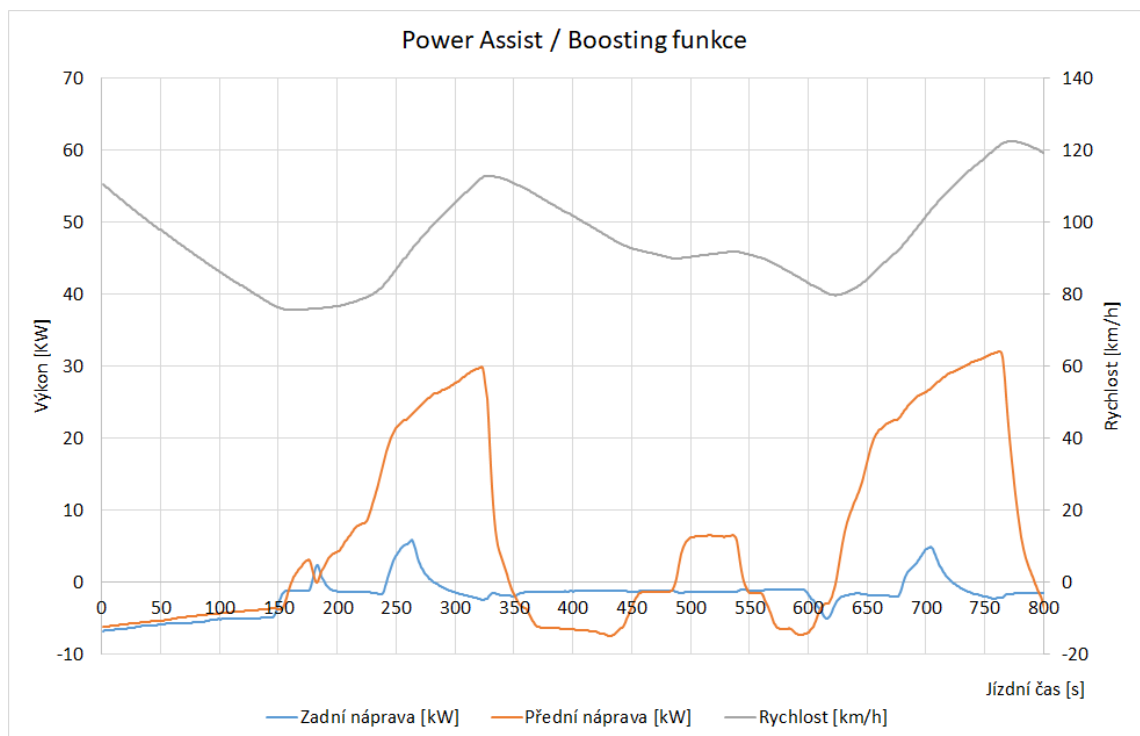
hlavní proměnné, kterými se strategie řídí v tomto případě, nejsou hodnoty jednoduše aplikovatelné do podmínek. Těchto dat by bylo velké množství a mohla by vzniknout velká časová prodleva v řízení (pokud přihlídneme k výpočetnímu výkonu elektronické řídicí jednotky), proto tato funkce zapadá do *map-based* 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.

7.3 Spolupráce obou druhů pohonu

7.3.1 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 7.3 (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).



Obrázek 7.3: Funkce power assist v testu pružného zrychlení

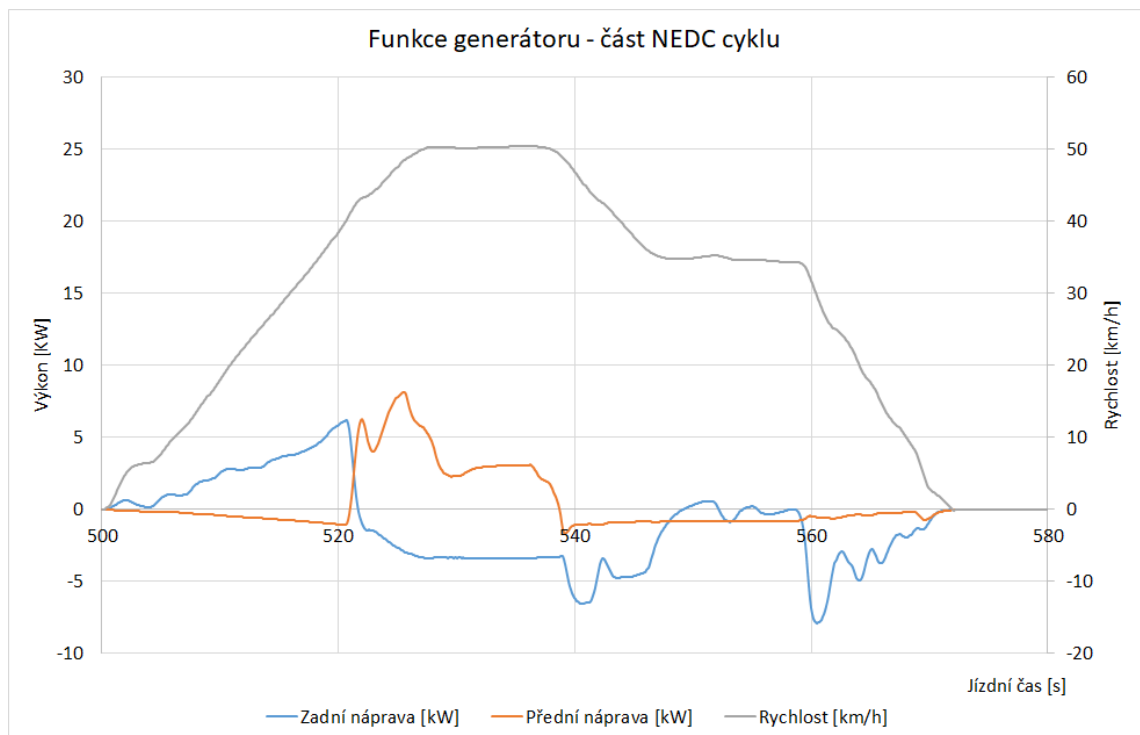
Po zhodnocení všech znaků chování systému řízení se funkce power assistu projevuje obdobně jako předchozí funkce - v mapě řídicí strategie je vytvořena oblast, která odpovídá

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.

7.3.2 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. Řídící 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 řidičův výkonový požadavek zvýšen, elektromotor se přepíná do generátorové funkce a rekuperuje energii do baterií právě hodnotou výkonu, která odpovídá zvýšení požadavku na výkon u spalovacího motoru. Vlastnost se projevila pouze v cyklu NEDC, ve kterém se pravidelně objevují úseky, kde se automobil pohybuje ustálenou rychlostí 50 km/h. Na obrázku 7.4 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.

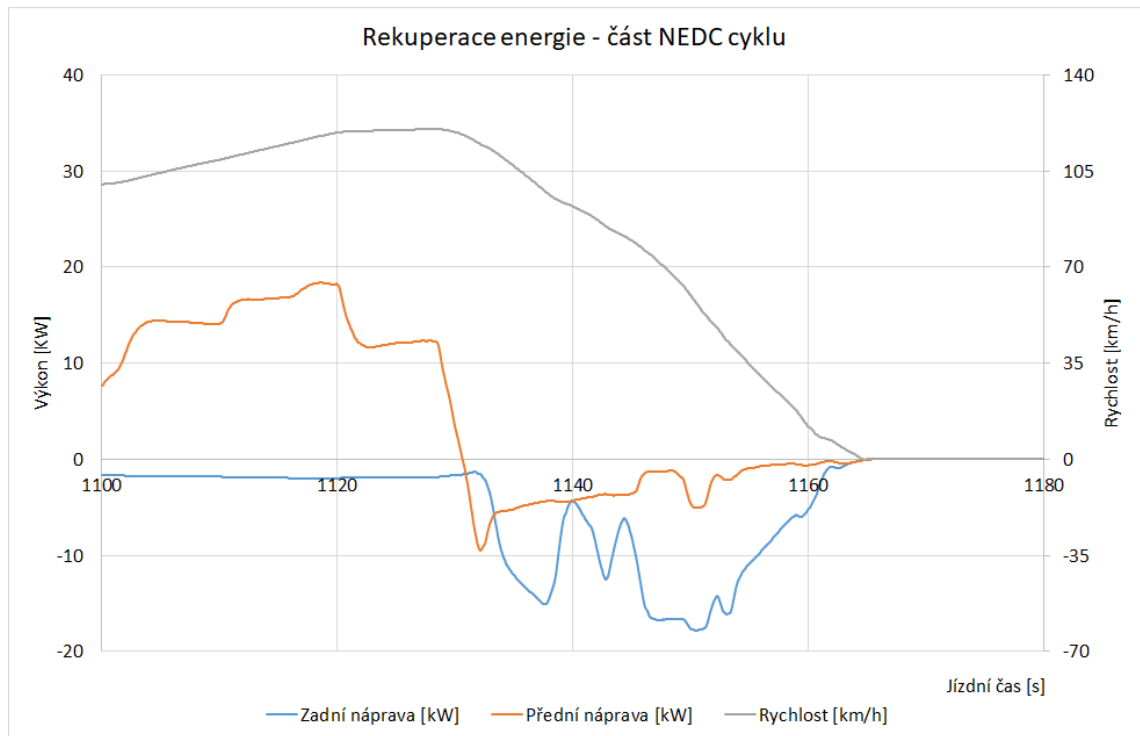
Strategie řízení je obdobná jako v případě power assistu, pouze řídicí jednotka místo výkonového požadavku sleduje dobu trvání jízdy ustálenou rychlostí, zda je dostatečně dlouhá, aby mělo smysl funkci dobíjení aktivovat. Optimalizace této funkce byla uskutečněna nejspíše pouze v *offline* režimu – NEDC cyklus byl několikrát opakován (s velice podobnými počátečními hodnotami *SoC*), úsek, ve kterém se funkce projevila se navíc opakuje v testu vícekrát. 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.



Obrázek 7.4: *Funkce generátoru v cyklu NEDC*

7.4 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).



Obrázek 7.5: Elektrická jízda v cyklu JC08

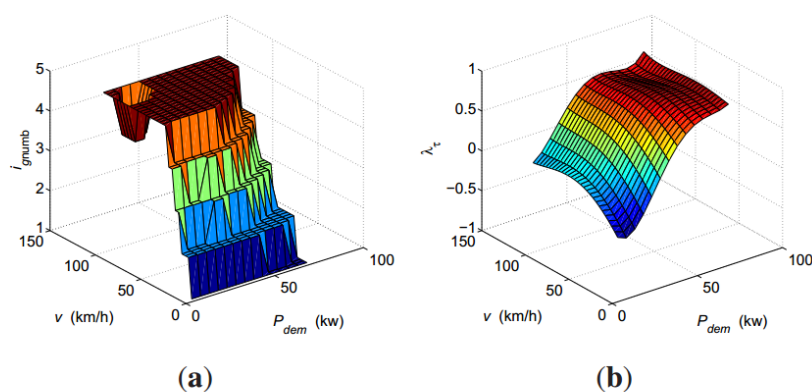
Pro zpětné získávání energie není nutné v řídicí strategii modelovat složité oblasti, jako je tomu u předchozích funkcí. Jedná se pouze o jednoduchou podmínkovou (*rule-based*) funkci; elektronická řídicí jednotka zjistí, že automobil jede na volnoběh/je sešlápnut pedál brzdy, *SoC* baterie je nízký a elektromotor ihned reaguje přeprnutím 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.

8 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 výše zmíněného typu je popsána v kapitole 4.1. Zde jen pro upřesnění zopakují, že 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 vytvořeno 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.



Obrázek 8.1: *Mapy řídicí strategie [10]*

Na obrázku 8.1 je zobrazeno, jak přibližně mohou vypadat mapy, uložené v elektronické řídicí jednotce testovaného automobilu. Na levé straně mapa pro zvolení rychlostního stupně, na pravé straně mapa pro řízení rozdělení točivého momentu. Podle toho, v jakém bodě se střetnou proměnné je určeno, jak bude systém řízen.

V této práci se ale nevěnujeme přímo matematickému modelování těchto map, proto si vystačíme s hodnocením, že se jedná o heuristickou strategii založenou na mapovém základu, která je doplněna o systémy optimalizace – zejména o použití předchozích a současných jízdních podmínek. Jak již bylo řečeno, prediktivní řízení systému (pokud jej vozidlo obsahuje) jsme nebyli schopni otestovat, v laboratoři není možné předpovídat budoucí jízdní podmínky, jelikož závisí zejména na systému GPS.

Závěr

V první části práce byla krátce popsána historie a používané systémy hybridních elektrických vozidel, dále jejich funkce a také typy strategií, používané k řízení pohonného ústrojí. Druhá část práce se zabývá samotným testováním a analýzou naměřených dat, aby bylo na závěr rozhodnuto o použité řídicí strategii.

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. Vhodným simulačním nástrojem je například program *GT-Power*, ale simulace již není předmětem této práce.

Seznam literatury

- [1] SOCHOR, Jiří. Údržba softwaru. *Zpravodaj ÚVT MU.*. 1996, VI(3), 15-20. ISSN 1212-0901.
- [2] Lohner-Porsche Semper Vivus. In: *Porsche Press Room USA* [online]. [cit. 2017-07-07]. Dostupné z: <http://press.porsche.com/admin/presspics/642.jpg>
- [3] LINO, Guzzela and SCIARETTA, Antonio. *Vehicle propulsion systems: introduction to modeling and optimization*. 3rd ed. Heidelberg: Springer-Verlag, 2013. ISBN 978-364-2359-132.
- [4] Toyota Prius PHV. In: *HybridCars.com — Auto alternatives for the 21st century* [online]. [cit. 2017-07-07]. Dostupné z: http://hybridcars.com/wp-content/uploads/2016/03/2017_Toyota_Prius_Prime_02.jpg
- [5] 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.
- [6] Emission Test Cycles: WLTC. *DieselNet: Diesel Emissions Online* [online]. [cit. 2017-07-07]. Dostupné z: <https://www.dieselnet.com/standards/cycles/wltp.php>
- [7] Lin, C.C., Peng, H., Grizzle, J.W. *A stochastic control strategy for hybrid electric vehicles*. In: Proc. of the 2004 American Control Conference, Boston, MA (2004)
- [8] Emission Test Cycles: Japanese JC08 Cycle. *DieselNet: Diesel Emissions Online* [online]. [cit. 2017-07-07]. Dostupné z: https://www.dieselnet.com/standards/cycles/jp_jc08.php
- [9] DS5 - Hybrid Diesel Vehicle. *Citroen Cyprus: Auto and new car for sale* [online]. [cit. 2017-07-07]. Dostupné z: <http://www.citroen.com.cy/wp-content/uploads/2013/04/full-hybrid-citroen-ds5.jpg>
- [10] Fan, J.; Zhang, J.; Shen, T. *Map-Based Power-Split Strategy Design with Predictive Performance Optimization for Parallel Hybrid Electric Vehicles*. *Energies* 2015, 8, 9946-9968.

Seznam obrázků

1.1	Lohner-Porsche Semper Vivus [2]	3
2.1	Schéma sériového hybridního vozidla	4
2.2	Schéma „ <i>single-shaft</i> “ hybridního vozidla	5
2.3	Schéma „ <i>double-shaft</i> “ hybridního vozidla	6
2.4	Schéma „ <i>Through-the-Road/Double-Drive</i> “ hybridního vozidla	6
2.5	Schéma kombinovaného hybridního vozidla s planetovou převodovkou	7
2.6	Schéma kombinovaného hybridního vozidla s hydrodynamickým měničem	7
4.1	Map-based řídicí strategie [3]	11
4.2	Rule-based řídicí strategie [3]	11
5.1	Schéma pohonného řetězce automobilu Citroën DS5 HYbrid4 [9]	14
5.2	Vozidlo v průběhu testování na válcové brzdě	14
6.1	New European Driving Cycle [5]	15
6.2	WLTP Class 3b Cycle [6]	16
6.3	SFTP US06 Cycle [5]	16
6.4	Japanese 10-15 Mode [5]	17
6.5	Japanese JC08 Cycle [8]	17
7.1	Elektrická jízda v cyklu JC08	20
7.2	Jízda se spalovacím motorem v cyklu SFTP US06	21
7.3	Funkce power assist v testu pružného zrychlení	22
7.4	Funkce generátorou v cyklu NEDC	23
7.5	Elektrická jízda v cyklu JC08	24
8.1	Mapy řídicí strategie [10]	25

Seznam tabulek

6.1	Porovnání jízdních cyklů [5]	15
6.2	Test pružnosti	18

Seznam příloh

Ukázka naměřených dat a grafů v souboru aplikace Microsoft Excel
Kniha Citroën DS5 HYbrid4