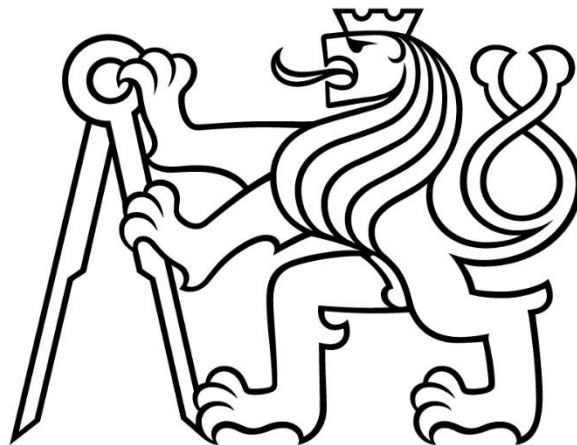


**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**TEZE
DISERTAČNÍ
PRÁCE**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta strojní
Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky

Teze disertační práce

Optimalizace jízdy silničního motorového vozidla

Ing. Petr Denk

Doktorský studijní program: Strojní inženýrství

Studijní obor
Mechanika tuhých a poddajných těles a prostředí

Školitel
Prof. Ing. Zbyněk Šika, Ph.D.

Název anglicky: Optimization of the road vehicle driving

Disertační práce byla vypracována v prezenční formě studia na Ústavu mechaniky, biomechaniky a mechatroniky Fakulty strojní ČVUT v Praze.

Disertant:

Ing. Petr Denk

Školitel:

Prof. Ing. Zbyněk Šika, Ph.D.

Oponenti:

Teze disertační práce byly rozeslány dne:

Obhajoba disertační práce se koná dne:

v zasedací místnosti č. 17 (v přízemí) Fakulty strojní ČVUT v Praze, Technická 4, Praha před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru Mechanika tuhých a poddajných těles a prostředí.

S disertační prací je možno se seznámit na oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojní ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6.

Prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.

Předseda odborové rady ve studijním oboru

Mechanika tuhých a poddajných těles a prostředí

Fakulta strojní ČVUT v Praze

Obsah

1.	Úvod.....	1
2.	Přehled současného stavu problematiky.....	3
2.1.	Obecná úloha optimalizace	3
2.2.	Vozidla s hybridními pohony (HEV)	3
2.3.	Řidič vozidla.....	5
2.4.	Jízdní trasa.....	6
2.5.	Souhrnná úloha optimalizace jízdy	6
2.6.	Shrnutí poznání o tématu eco-drivingu v odborné literatuře.....	8
3.	Cíle disertační práce	9
4.	Definice a popis jízdní dráhy.....	10
4.1.	Základní idea popisu jízdní dráhy	10
4.2.	Dělení jízdní dráhy dle zvolených kritérií.....	11
5.	Simulační model vozidla s hybridním pohonem.....	14
5.1.	Koncept simulačního modelu vozidla	14
5.2.	Rovnice simulačního modelu vozidla	15
5.3.	Řídící struktura simulačního modelu HEV	17
6.	Koncept a provedení optimalizační úlohy.....	18
6.1.	Definice optimalizační úlohy	18
6.2.	Rozbor řešitelnosti optimalizační úlohy.....	18
6.3.	Definice cílové funkce optimalizační úlohy.....	20
6.4.	Globální úroveň optimalizace	20
6.5.	Lokální úroveň optimalizace	21
6.6.	Použité optimalizační algoritmy.....	22
7.	Výsledky z použití optimalizačního algoritmu	24
7.1.	Referenční jízdní trasa a referenční vozidlo.....	24
7.2.	Ověření funkce lokální úrovně optimalizace.....	25
7.3.	Ověření globální úrovně optimalizace	26
7.4.	Ověření funkce celé optimalizační úlohy.....	27
7.5.	Modifikace optimalizačního algoritmu celé úlohy.....	28
8.	Závěr.....	31
9.	Literatura	33
9.1.	Použitá literatura.....	33

9.2.	Publikace autora vztahující se k disertační práci.....	36
------	--	----

1. Úvod

Současný vývoj v automobilovém průmyslu se mimo zvyšování aktivní a pasivní bezpečnosti nebo zvyšování komfortu přepravy zaměřuje ve velké míře také na optimalizaci spotřeby pohonných hmot vozidla a zároveň tak nepřímou na snižování tvorby emisí CO₂ a NO_x. Snaha směřující k optimalizaci spotřeby pohonných hmot je z části motivována zlepšováním vlastního výrobku přímo automobilkou a z neopomenutelné části také stále se zpřísňujícími legislativou spojenou s provozem silničních motorových vozidel v Evropě i po celém světě. Obecně existuje mnoho způsobů, jak optimalizovat spotřebu pohonných hmot a zároveň existuje více cílů takové optimalizace. Prvním a nejlogičtějším cílem takové optimalizace se jeví minimalizace spotřeby hnací energie ve smyslu minimalizace množství dodávaného paliva na ujetou jednotku vzdálenosti. Druhým cílem obdobné optimalizace se však může stát minimalizace spotřeby hnací energie vzhledem k ceně přepravy. Zde je však nutné uvést, že první zmíněný cíl je možný pro vozidla se všemi typy pohonů, avšak ten druhý je možné použít pouze u vozidel s několika možnými typy pohonů – pro vozidla s hybridním pohonem. Pro vozidla pouze s jedním typem pohonu totiž první a druhý cíl splynou v totožný.

Rozdělení cílů optimalizace jízdy vozidla do uvedených dvou skupin zároveň poddhaluje dostupné možnosti a nástroje vlastní optimalizace jízdy vozidla. Jako jeden z těchto nástrojů můžeme uvažovat různé nové koncepty hnacího ústrojí vozidla, které bude již při svém vývoji zaměřováno na optimalizaci svých parametrů vzhledem k uvažovanému provoznímu cyklu vozidla. Jako druhý princip optimalizace pak lze uvažovat optimalizaci řídicích procesů pro jedno dané vozidlo, zejména vzhledem k okamžitému stavu jízdní dráhy a provozních podmínek na ní. Každý uvedený cíl lze považovat za samostatnou optimalizační úlohu, která je však zaměřena a omezena pouze na jednu z dostupných možností optimalizace. Nejlepších výsledků optimalizace se však dá dosáhnout vždy pouze spojením obou uvedených možností. Výsledkem této kombinace se pak stane spojená optimalizace konstrukce a provozu vozidla. Pro soubor zcela obecných jízdních tras však není možné provést optimalizaci konstrukce vozidla, avšak jistému stupni optimalizace konstrukce hnacího agregátu vozidla pro jednotlivé jízdní trasy lze dosáhnout pro vozidla s hybridním pohonem, u kterých lze za změnu konstrukce hnacího agregátu uvažovat přerozdělení hnacího výkonu mezi jednotlivé zúčastněné motory. Každá optimalizace jízdy však je také závislá na tvaru a dalších attributech jízdní trasy. Zcela obecně lze nalézt dvě formulace úlohy optimalizace jízdy vozidla [1]. Prvním takovou formulací můžeme uvažovat úlohu, která vyhledává optimální jízdní trasu mezi stanoveným počátečním a konečným bodem. Tato úloha je všeobecně nazývána úlohou „eco-routingu“. Optimalizační omezení této úlohy je pak dáno na jednu stranu hustotou silniční sítě a na stranu druhou. Jízdní chování vozidla však musí být předem dané. Naproti tomu se nabízí druhý typ optimalizační úlohy, jehož vstupem je předem definovaná a neměnná jízdní trasa (získaná například z běžných GPS navigačních softwarů) a cílem optimalizace průběh podélné rychlosti vozidla, který zároveň nepřímou odpovídá posloupnosti řídicích zásahů vozidla. Takto definovaná úloha se v odborné

1. ÚVOD

literatuře nazývá úlohou „eco-drivingu“ a je možné jí definovat pro vozidla s jedním typem pohonu nebo pro vozidla s pohony hybridními.

Disertační práce, ke které náleží tyto teze, je zaměřena na spojenou optimalizaci podélné dynamiky vozidla a náležitějšího řízení hnacích agregátů vozidla s hybridním pohonem metodou eco-drivingu.

2. Přehled současného stavu problematiky

2.1. Obecná úloha optimalizace

Obecnou optimalizací průjezdu vozidla danou trajektorií se od počátku dopravy zabývalo a zabývá mnoho studií vznikajících v kruzích akademických a v nemalé míře i v kruzích průmyslových. Cíle takové optimalizace však byly a jsou často velmi rozdílné. Některé cíle směřují například k maximalizaci rychlosti průjezdu vozidla danou trasou nebo k optimalizaci průjezdu nadrozměrného vozidla danou trasou. Posledními a v současné době asi nejvíce sledovanými cíli optimalizace průjezdu vozidla metodou eco-drivingu jsou cíle vedoucí k minimalizaci spotřeby hnací energie a s tím související minimalizace emisí CO₂ a NO_x u vozidel poháněných spalovacím motorem [2], nebo minimalizace spotřeby u vozidel poháněných elektromotorem [3]. Ač se na první pohled zdá, že se jedná o naprosto rozdílné optimalizace s obecně rozdílnými cíli a rozdílnými možnostmi, není toto tvrzení zcela pravdivé. Všechny tyto optimalizace totiž spojují dvě základní skutečnosti [4]:

- a) jízdní dráha a její dobrá znalost
- b) matematický model vozidla uzpůsobený pro optimalizační úlohu

Uvedené dvě spojitosti všech zmíněných úloh, ač hledajících různá optima, zároveň znamenají, že je třeba sledovat v literatuře více různých a zdánlivě nesouvisejících směrů, nikoli jen směr vedoucí čistě k úlohám eco-drivingu. Prvním směrem je určitě jízdní trasa a její všeobecný popis, druhým samotné vozidlo, jeho konstrukce, omezení a další. Následně je nutné sledovat směry vedoucí k řešení různých úloh, které úzce spojují vlastnosti vozidla a jízdní trasy, bez ohledu například na cíle optimalizace (viz například [5]). Obdobně je vhodné sledovat i optimalizace se stejným cílem, avšak pro jiné typy pohonů, v tomto případě separátně pohonů elektrických, pohonů spalovacím motorem a na závěr též pohonů hybridních. Tyto optimalizace jsou pak součástí různých rozšířených asistenčních navigačních systémů.

2.2. Vozidla s hybridními pohony (HEV)

Vozidlem s hybridním pohonem rozumíme jakékoli vozidlo, které pohání více než jeden typ hnacího motoru [6]. Hybridní vozidla se rozdělují do různých kategorií podle dvou kritérií. Prvním kritériem je stupeň hybridizace (DOH – Degree of hybridization [7]), které je založeno na poměru nominálních výkonů jednotlivých motorů v hnacím agregátu HEV. Hybridní pohony se pak rozdělují do následujících kategorií [8]:

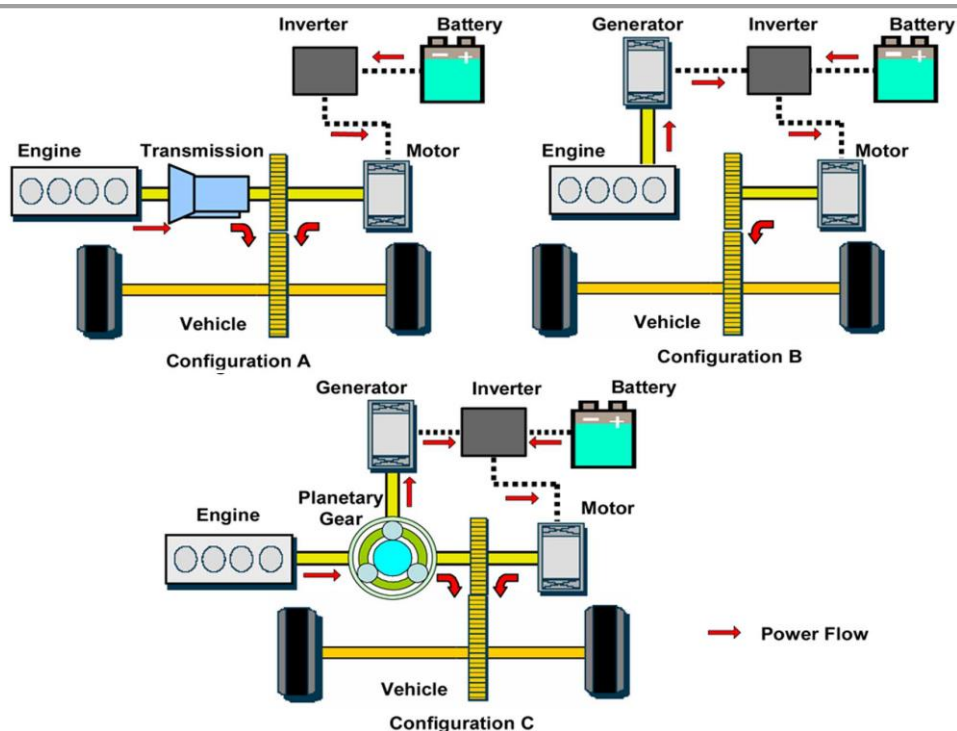
- „Micro hybrid“ – vozidlo s majoritním spalovacím motorem je vybaveno rozšířenou elektrickou výbavou zahrnující akumulátor s vyšší kapacitou, výkonný startér a výkonný alternátor. Elektrická výzbroj je určena k realizaci systému „start-stop“ a ke zvýšení množství rekuperované energie pomocí alternátoru zpět do vozidlového akumulátoru.

- „Mild hybrid“ – vozidlo s majoritním spalovacím motorem a pomocným elektrickým motorem o výkonu řádově nižším než u spalovacího motoru. Elektromotor slouží zejména ke zvýšení výkonu hnacího agregátu při akceleraci vozidla a k rekuperaci energie do vozidlového akumulátoru během decelerace vozidla.
- „Full hybrid“ – vozidlo, které může být poháněno nezávisle jedním nebo druhým druhým typem hnacího motoru případně kombinací obou. Elektromotor vozidla může zároveň sloužit pro aplikaci „start-stop“ systému spalovacího motoru nebo jako samostatná pohonná jednotka pro jízdu v zónách s předepsanými nulovými emisemi CO₂. Nabíjení vozidlové baterie je však možné pouze ze spalovacího motoru nebo rekuperací z kinetické energie vozidla. Pomocné agregáty u těchto vozidel jsou nejčastěji poháněny výlučně elektrickou energií, nikoli odvozeny od pohonu spalovacího motoru.
- „Plug-in hybrid“ (PHEV) svou koncepcí odpovídá „full hybridu“ s tím rozdílem, že je možné vozidlovou baterii nabíjet z vnějšího zdroje energie. Z důvodu uchování velkého množství energie z nabíjecí stanice jsou tyto hybridy vybaveny vozidlovou baterií s výrazně vyšší kapacitou než vozidla ze skupiny full hybridů.
- „Hybrid electric vehicle“ – vozidlo s majoritním pohonem elektromotorem a pomocným spalovacím motorem o řádově nižším výkonu. Spalovací motor slouží zejména pro dobíjení vozidlové baterie nebo ke zvýšení výkonu hnacího agregátu při akceleraci vozidla. Uspořádání hnacího agregátu je vždy v paralelním uspořádání, tedy spalovací motor pohání vozidlová kola pomocí mechanických převodů. Označení tohoto vozidla se používá jako označení pro jakékoli hybridní vozidlo.
- „Range extender“ – vozidlo s majoritním pohonem elektromotorem a spalovacím motorem o řádově nižším výkonu. Spalovací motor slouží pouze k dobíjení vozidlové baterie, a tím k prodloužení dojezdu vozidla, jedná se proto výlučně o sériové uspořádání hnacího agregátu. Vozidlový akumulátor je taktéž možné dobíjet z vnějšího zdroje.

Dalším kritériem pro rozdělení hnacích soustrojí hybridních vozidel je uspořádání hnacího řetězce ve vztahu k mechanické vazbě motorů vůči hnací nápravě. Hybridní pohony se v tomto smyslu rozdělují do následujících skupin [9]:

- „Sériové hybridní pohony“ – hybridní pohony se sériovým uspořádáním hnacího agregátu. V této koncepci není mezi hnacím agregátem a poháněnou nápravou přímý mechanický převod.
- „Paralelní hybridní pohony“ – hybridní pohony s paralelním uspořádáním hnacího agregátu. V této koncepci je přímé mechanické propojení hnacího agregátu a hnané nápravy.
- „Sérioparalelní hybridní pohon“ – hybridní pohony se smíšenou koncepcí. V této koncepci je pro některé nastavení možné najít sériové i paralelní uspořádání hnacího agregátu.

Tři základní koncepty hnacího agregátu uvádí následující obrázek:



Obrázek 1: Schématické znázornění třech základních konceptů hnacího ústrojí hybridních vozidel [10] (vlevo nahoře uspořádání paralelní, vpravo nahoře uspořádání sériové, dole uspořádání sérioparalelní)

2.3. Řidič vozidla

Řidičem vozidla obecně rozumíme osobu, která pomocí HMI (Humane Machine Interface) dává vozidlu řídicí pokyny k jízdě na základě sledovaných podnětů z okolí. Řidič vozidla se tak stává primárním regulátorem vozidla při jízdě na vozovce v regulační smyčce částečně zpětnovazební a částečně prediktivní [11]. Zpětnovazební složka řidiče je založena zejména na sledování stavu vozidlových agregátů pomocí kontrolních přístrojů (například teploty motoru), sledování aktuálního průběhu jízdních parametrů vozidla (například okamžité rychlosti vozidla) a sledování a přizpůsobování jízdy okamžitému stavu posádky a nákladu vozidla. Prediktivní složka řidiče vozidla spočívá zejména v první řadě ve sledování provozní situace před vozidlem s predikčním horizontem daným vzdáleností výhledu z vozidla (například sledování hustoty provozu před vozidlem nebo dopravního značení podél vozovky) a v druhé řadě také sledování s totožným predikčním horizontem stavu povrchu vozovky (například přítomnost náledí) a všem dalším vlivům vztaženým k vozovce (například možnosti bočního větru) [12]. Za specifickou vlastnost řidiče, vstupující jako informační zdroj do řídicí smyčky, lze považovat také historické informace/zkušenosti pocházející z předchozích průjezdů jednotlivými místy dané trasy a zároveň i další vnější informační vstupy řidiče, například o dopravní situaci v horizontu predikce větším než v dohledné vzdálenosti. Tyto vstupy řidič v dnešní době získává nejčastěji z dopravního zpravodajství nebo jako pomocné informace z různých navigačních systémů [13].

Řidič dále svou volbou maximálního jízdního času například přímo určuje také průměrnou rychlost přepravy na dané dráze a tím také přímo definuje jízdní styl průjezdu vozidla danou trasou [14]. Zvolená velikost jízdního času zároveň velmi omezuje další

možnosti optimalizace. Není-li jízdní čas jednoznačně dán, řidič je schopen vhodným jízdním chováním snížit spotřebu průměrně cca o 15 % oproti běžnému řidiči. Uvedená hodnota je založena na studii opakovaného průjezdu vozidel stejnou trasou s různými řidiči při jejich různém psychickém rozpoložení [15].

2.4. Jízdní trasa

Jízdní trasou rozumíme zvolenou jízdní trajektorii vozidla, respektující silniční síť a všechna k tomu vázaná legislativní omezení. Součástí jízdní trasy jsou kromě trajektorie také informace o stavu povrchu vozovky, o aktuálním počasí a další informace přímo ovlivňující jízdní omezení vozidla [16]. Z takto získaných informací lze sestavit jízdní trasu a jí náležející jízdní omezení, ovšem pouze na základě informací vázaných k všeobecnému stavu vozovky a okolí, bez vlivu provozní situace na vozovce. Separátní složkou jízdní trasy tak lze uvažovat také informace související s provozní situací na vozovce. Základními vstupy těchto informací mohou být informace získávané z pomocných vstupů různých GPS navigačních systémů a map, které však mají spíše všeobecnou platnost k delšímu úseku uvažované jízdní trasy (například informace o vzniku kolony stojících nebo pomalu jedoucích vozidel v některé pasáži jízdní trasy). Přesnější informace o provozním stavu podél jízdní trasy lze získat z dalších informačních zdrojů, založených například na V2I (Vehicle to infrastructure) nebo V2V (Vehicle to Vehicle) komunikaci [17] [18] [19].

2.5. Souhrnná úloha optimalizace jízdy

Souhrnnou úlohou optimalizace řízení vozidla rozumíme sestavení optimalizační úlohy pro optimalizaci průjezdu vozidla podél stanovené jízdní trasy na základě zvoleného kritéria optimality a zvolených optimalizačních vstupů. Výstupem takto definované optimalizační úlohy, s přihlédnutím k definování cíle optimalizace jako úlohy eco-drivingu, je asistenční navigační systém, který pro danou jízdní trasu hledá optimální soustavu řídicích zásahů řidiče vozidla, které zaručí průjezd vozidla s optimalizovanou hodnotou spotřeby hnací energie.

Uvedené asistenční systémy vždy byly a jsou předmětem teoretického výzkumu i praktických průmyslových aplikací. V oblasti teoretického výzkumu lze najít následující základní asistenční systémy:

- ACC (Adaptive Cruise Control) - adaptivní tempomat – je všeobecná metoda optimalizace sledující na krátkou vzdálenost dopravní situaci před vozidlem (jmenovitě soustavou čidel jakou součástí vybavení vozidla), dle které následně regulátor reguluje vzdálenost od předchozího vozidla. Tento adaptivní tempomat optimalizuje podélnou rychlost vozidla, avšak primárně na základě dopravní situace, nikoli reálné spotřeby vozidla.
- CACC (Cooperative Adaptive Cruise Control) - kooperující adaptivní tempomat – je rozšířením výše uvedeného adaptivního tempomatu, přičemž rozšíření spočívá zejména v objemu vstupních údajů optimalizace. Výstupy i omezení využití kooperujícího adaptivního tempomatu jsou totožné s běžným adaptivním

tempomatem, ovšem jako vstup do optimalizace slouží soubor vstupních dat zahrnujících informace o více než jednom vozidle, případně informace získané z okolní pevné infrastruktury (komunikace V2V a V2I).

Dále existuje mnoho dalších typů obdobných asistenčních systémů, které jsou však vždy variací na dva uvedené základní principy. Souhrnnou vlastností všech těchto systémů však je, že v rámci optimalizace primárně nezohledňují samotnou konstrukci vozidla a jeho hnacího agregátu a využívají v rámci optimalizace pouze obecné principy optimální jízdy vozidla (minimalizace zrychlení a zpomalení vozidla apod.).

Tento nedostatek pak řeší průmyslová řešení podobných systémů, která výrobci vozidel implementují co svých vozidel s pevně definovanou konstrukcí. Za zmínku zde stojí následující dvojice těchto systémů:

- PCC (Predictive Cruise Control) – od výrobce nákladních vozidel DAF [20]. Funkce tohoto asistenčního systému je založena na sledování výškového profilu vozovky, kterému vozidlo přizpůsobuje své jízdní chování. Funkce tohoto systému je však omezena pouze na případy jízdy se stoupáním a následným klesáním (přejezd vrcholku) a předmětem optimalizace je vhodný průběh hnacího výkonu na takto selektivně vybrané části jízdní dráhy.
- Porsche InnoDrive – od výrobce sportovních a luxusních vozidel Porsche [21], určený pro vozidla Panamera s hybridním pohonem. Představený asistenční systém je opět založen na základní myšlence adaptivního tempomatu. I zde je jeho původní funkce rozšířena na určení rychlostního profilu vozidla a vhodné strategie řazení, ovšem s jinak definovaným cílem. Dle dostupných informací je možné systém provozovat v běžném režimu nebo režimu SPORT, kde oba režimy hledají optimální rychlostní profil vozidla, zde ovšem s přihlédnutím zejména k bezpečnosti průjezdu vozidla zatáčkami a obecně ke stabilitě a komfortu jízdy. Predikční horizont je zde omezen hodnotou 1,8 km. Přerozdělení hnacích výkonů na jednotlivé motory je získáno sekundárně pro optimalizovaný rychlostní profil bez přímé vazby na celkovou spotřebu energie.

Poslední sledovanou složkou jsou souhrnné úlohy optimalizace jízdy vozidla v odborné literatuře. V odborné literatuře se vyskytuje několik směrů výsledků výzkumu optimalizace jízdy vozidla metodou eco-drivingu. Některé se zaměřují pouze na optimalizaci vozidel se spalovacím motorem [2], jiné na optimalizaci vozidel poháněné pouze elektromotorem [3] a ty poslední pro hybridní vozidla různých konstrukcí [22] [23] [24]. Základní a společnou vlastností všech těchto optimalizací je na straně jedné velmi jednoduchý fyzikální model vozidla založený pouze na podélné dynamice vozidla a jeho propojení na odpovídající fyzikální model hnacího motoru (nejčastěji založeného na Look-up tabulkách). Na straně druhé jsou všechny prováděné optimalizace pro vozidla s hybridním pohonem omezeny vždy na určitý specifický manévr nebo část jízdní trasy, nikoli na celou obecnou trasu. Takto

provedená optimalizace pak svou koncepcí odpovídá provedením průmyslovým zmíněným výše.

2.6. Shrnutí poznání o tématu eco-drivingu v odborné literatuře

Výše byly představeny řešerše různých úloh a vlivů jednotlivých prvků na sestavení celkové úlohy eco-drivingu. Některé sledované souhrnné úlohy optimalizace metodou eco-drivingu byly zaměřeny na optimalizaci vozidel s jedním pohonem, jiné na optimalizaci pro vozidla s hybridním pohonem. Pro všechny úlohy však platilo několik totožných atributů. Prvním z nich byl vždy jednoduchý fyzikální model vozidla, zahrnující pouze podélnou dynamiku vozidla a tomu odpovídající charakteristiku hnacího agregátu. Fyzikální modely dalších agregátů vozidla nebyly uvažovány. Druhým atributem byla jízdní dráha a její parametry. Všechny prezentované odborné články byly vždy zaměřeny na optimalizaci jízdy vozidla na nějakém krátkém úseku nebo na jednom specifickém jízdním manévru. Na základě výše uvedeného rozboru současného stavu poznání byly vytvořeny specifické cíle této dizertační práce, které jsou detailněji popsány v následující kapitole.

3. Cíle disertační práce

Na základě výše uvedeného současného stavu problematiky byla nalezena dvě omezení stávajících úloh optimalizace eco-drivingu. Prvním zmíněným omezením je použitý fyzikální model, omezující se pouze na podélnou dynamiku vozidla a k tomu navázaný model hnacího agregátu. Druhým zmíněným omezením je charakter jízdní trasy, omezený vždy nějakým délkovým horizontem nebo určitým jízdním manévrem.

Obecné cíle dizertační práce směřují k rozšíření matematického modelu vozidla o další energetické agregáty vozidla a zároveň směřují k optimalizaci jízdy hybridního vozidla na zcela obecné trase.

Jmenovité cíle této dizertační práce jsou dány následujícími body:

- a) Navrhnout kinematický popis jízdní dráhy vozidla vhodný k použití pro optimalizaci.
- b) Sestavit simulační model vozidla pro zvolenou variantu hnacího agregátu a vytvořit soubor optimalizačních parametrů vnějšího chování vozidla a vnitřních toků energie.
- c) Navrhnout optimalizační algoritmus pro spojenou optimalizaci jízdního chování vozidla při jízdě podél stanovené trasy s přihlédnutím k vedlejším spotřebám vozidla.
- d) Provést optimalizace pro zvolený matematický model vozidla a zvolené jízdní dráhy.

4. Definice a popis jízdní dráhy

4.1. Základní idea popisu jízdní dráhy

Definice a konstrukce popisu jízdní dráhy je jednou z klíčových částí celé optimalizační úlohy. Vstupem do popisu jízdní dráhy úlohy eco-drivingu je trasa vygenerovaná běžným navigačním softwarem (například Nokia HERE). Výstup z popisu jízdní dráhy je formován již konstrukcí celé optimalizační úlohy. Popis jízdní trasy je obecně podmíněn potřebě sestavení obecného rychlostního profilu podél celé jízdní dráhy. Tvorba rychlostního profilu v každém bodě jízdní dráhy je funkcí mnoha atributů této dráhy, zejména však rychlostním omezením v každém jejím bodě. Rychlostní omezení je generováno následujícími skutečnostmi:

- legislativní omezení rychlosti vozidla (může být rozdílné pro jednotlivé kategorie vozidel)
- fyzikální omezení rychlosti vozidla (dáno zejména mezní hodnotou bočního zrychlení karosérie při průjezdu zatáčkou)

Zmíněné rychlostní omezení vytvoří podél celé jízdní dráhy obecně nespojitou křivku rychlostního omezení vozidla (viz Obrázek 8 na straně 18), která celou jízdní trasu rozděluje na menší úseky dle kritéria maximální povolené rychlosti. Stejným způsobem však je možné takto získané úseky v dalším kroku rozdělit na další menší úseky dle dalších kritérií, které mají majoritní vliv na konstrukci lokálního rychlostního profilu. Takto lze v souladu se schématem na následujícím obrázku rozdělit celou trasu na soustavu na sebe navazujících menších úseků, ve kterých je vždy daná soustava atributů konstantní.



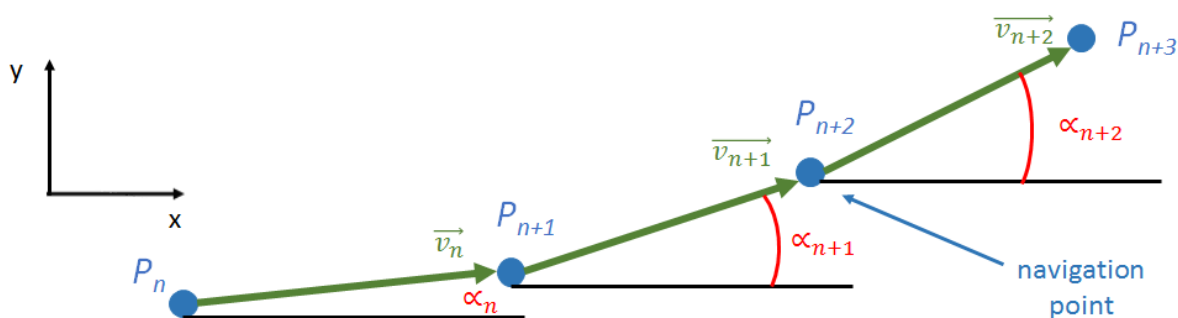
Obrázek 2: Vývojový diagram kaskádního dělení jízdní trasy na jednotlivé sekce [25]

Pro sestavení popisu jízdní dráhy v rámci řešení úlohy eco-drivingu vozidel s hybridním pohonem byla zvolena následující sada kritériálních parametrů dělení:

- maximální možná rychlost vozidla (získaná na základě legislativní a fyzikální maximální rychlosti)
- teplota nebo ekvivalentní teplota vzduchu okolo vozidla (s přihlédnutím k aktuálním povětrnostním podmínkám)
- adhezní podmínky, zejména součinitele valivého odporu vozidla (adhezní součinitel pneumatiky vůči vozovce je implicitně zahrnut již ve fyzikálním rychlostním limitu)
- celková hmotnost vozidla a nákladu (úbytek hmotnosti vozidla daný úbytkem paliva není vzhledem k procentuální výši vůči celkové hmotnosti vozidla uvažován)

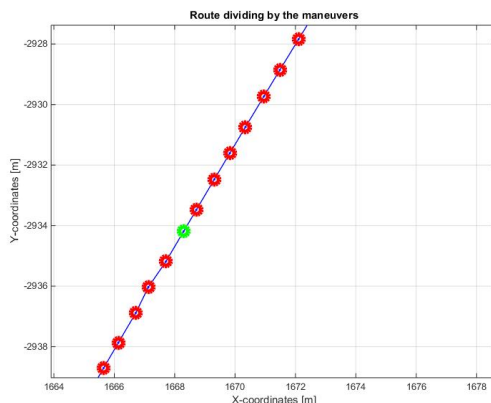
4.2. Dělení jízdní dráhy dle zvolených kritérií

Prvním a základním kritériem pro rozdělení jízdní dráhy do menších úseků je rozdělení dle maximální možné rychlosti. Maximální možná rychlost je omezená buď legislativní hodnotou omezení, nebo fyzikální hodnotou omezení vycházející z dovolené hodnoty bočního zrychlení. Jako omezení pro každý bod jízdní trasy se uplatní nižší z těchto dvou hodnot. Hodnoty maximálního bočního zrychlení je závislá na dvojici parametrů – poloměru zakřivení jízdní dráhy a okamžité dopředné rychlosti vozidla. Hodnota maximálního bočního zrychlení vychází ovšem z adhezního silového omezení kontaktu pneumatiky a vozovky, dále korigované koeficientem jízdního komfortu. Slouží proto jako vstup do úlohy dělení jízdní dráhy podle rychlostního omezení. Pro takto definovanou hodnotu bočního zrychlení je naopak získat inverzní úlohou hodnotu maximální dopředné rychlosti pro stanovené maximální boční zrychlení a okamžitého zakřivení jízdní dráhy. Okamžité zakřivení jízdní dráhy je získáno analýzou směrových vektorů na sebe navazujících navigačních bodů dle myšlenky uvedené na následujícím obrázku:



Obrázek 3: Vyhledávání jízdních manévrů pomocí vektorů nejnižšího řádu ($n=2$) [25]

Analýzou tvaru jízdní trasy dle tohoto schématu je možné přiřadit každému bodu jízdní trasy atribut zakřivení jízdní trasy v daném místě, který je generován ze zvoleného množství okolních bodů (viz „řád vektoru“ zmíněný v popisu obrázku). Příklad výsledku takového procesu uvádí následující obrázek:

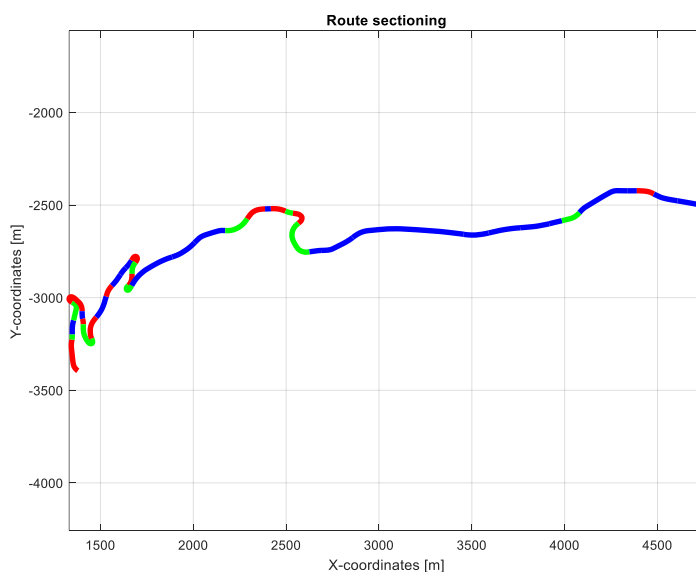


Obrázek 4: Zobrazení nekorektního navigačního bodu a okolních jízdních manévru [26] (červené body reprezentují manévry pravé, zelené body manévry levé)

Vzhledem k nepřesnosti měření navigačních bodů běžnými navigačními softwary může pro některé trasy (zejména v přímých úsecích trasy) nastat případy vadných navigačních bodů (viz Obrázek 4). Podobné body je nutné filtrovat. Filtrace je obecně možná dvojicí přístupů. Prvním přístupem je vyhledávání osamocených bodů nebo malých shluků osamocených bodů jízdní trasy a jejich následná korekce. Druhým přístupem je možné využít přístupu změny velikosti směrového vektoru, který nemusí určovat směrový vektor dvou následujících bodů, ale více následujících bodů (takto lze získat směrový vektor řádu 3, který spojuje bod okamžitý s bodem na trase o dva dále apod.) [26].

V druhém kroku filtrace je vhodné části jízdní trasy s malými změnami hodnot směrového úhlu definovat jako úseky přímé. Velikost tohoto pásma necitlivosti je vhodné volit vzhledem k uvažované délce vozidla.

Tímto způsobem je možné získat dělení jízdní trasy dle jízdního manévru a k tomu navazující hodnoty zakřivení jízdní trasy dle následujícího obrázku:



Obrázek 5: Konečné rozdělení trasy do jízdních sekcí (červenou barvou manévry s pravou zatáčkou, zelené s levou zatáčkou a modře sekce uvažované jako přímé) [27]

Hodnota zakřivení jízdní dráhy v každé části jízdní trasy uvažované se zatáčkou (červené a zelené) je dána nejmenší hodnotou zakřivení v celém tomto úseku.

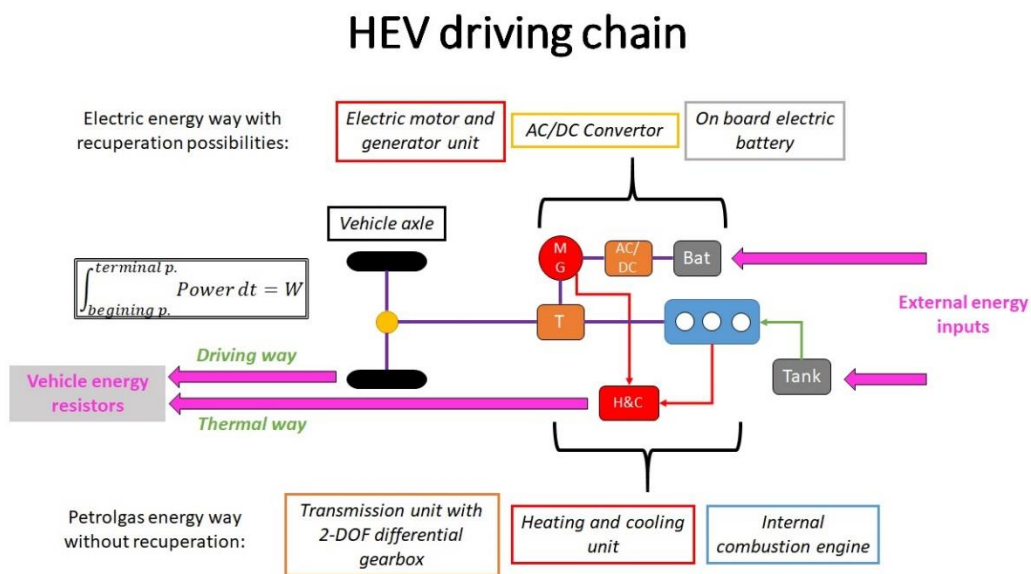
Takto získané první jízdní sekce se dále dělí na menší sekce podle dalších kritérií dle výše uvedeného vývojového diagramu (viz Obrázek 2). Všechny další zvolené parametry jsou však podél jízdní dráhy plně spojité. Pro následné dělení podle těchto parametrů je proto nutné zvolit velikost pásma necitlivosti v každé sekci (například pro dělení podle okolní teploty volba pásma necitlivosti 1 °C).

Výstupem z popisu jízdní trasy bude soustava na sebe navazujících jízdních sekcí, v nichž budou hodnoty zvolených kritérií konstantní.

5. Simulační model vozidla s hybridním pohonem

5.1. Koncept simulačního modelu vozidla

Pro optimalizaci jízdy vozidla v rámci prezentované disertační práce bylo zvoleno vozidlo s hybridním pohonem v paralelním uspořádání. Jak bylo uvedeno v kapitole 2.5, simulační model vozidla zohledňuje v první řadě podélnou dynamiku vozidla, spolu s její vazbou na hnací agregát a hnací soustrojí vozidla. V další řadě však tento simulační model musí zohledňovat i ostatní výkonové agregáty vozidla a jejich řízení. Z povahy konstrukce hnacího agregátu hybridního vozidla a jeho ostatních výkonových agregátů řídí simulační model obecně tok dvou forem energie – energii mechanickou a energii tepelnou (chemická energie fosilního paliva a elektrochemická energie z vozidlové baterie je implicitně obsažena v matematických modelech motorů a vozidlové baterie sadou vstupních parametrů). Formálně je tak možné řízené energetické toky mezi agregát vozidla rozdělit do dvou okruhů. Následující obrázek uvádí schematicky okruh toku mechanického výkonu, okruh toku tepelného výkonu a naznačuje taktéž jejich propojení.



Obrázek 6: Energetické toky mezi jednotlivými agregáty HEV [28]

Z uvedeného rozdělení fyzikálního modelu vozidla na okruh toku mechanické energie, okruh toku tepelné energie a okruh toku energie pomocných agregátů (viz Obrázek 6) přímo vychází i konstrukce fyzikálního modelu uvažovaného hybridního vozidla, který lze rozčlenit do několika samostatných dílčích kapitol dle následujícího rozdělení:

- Mechanický okruh vozidla obsahuje:
 - fyzikální model jízdních odporů vozidla
 - fyzikální model převodovky a převodů
 - fyzikální model spojky
 - momentové a úplné charakteristiky jednotlivých hnacích motorů

- ztrátové a účinnostní charakteristiky jednotlivých hnacích motorů
- fyzikální model pneumatiky
- fyzikální model toku energií mezi hnacími motory a primárními zdroji energie
- Tepelný okruh vozidla obsahuje:
 - tepelný okruh chlazení spalovacího motoru (do chladicího média)
 - tepelný okruh rozvodu ztrátového tepla ze spalovacího motoru (chlazení motoru)
 - tepelný okruh vytápění kabiny vozidla
 - tepelný okruh chlazení elektrického motoru (do chladicího média)
 - tepelný okruh rozvodu ztrátového tepla z elektromotoru (chlazení elektromotoru)
 - tepelný okruh vozidlové baterie (chlazení a vytápění z chladicího média)
 - tepelný okruh rozvodu ztrátového tepla/vytápění vozidlové baterie (chlazení/klimatizace vozidlové baterie)
- Okruh pomocných a přídavných agregátů obsahuje:
 - osvětlení vozidla
 - asistenční systémy vozidel (ABS, ESP, posilovač řízení aj.)
 - pomocná chladicí a topná zařízení
 - navigační a informační systémy vozidla

5.2. Rovnice simulačního modelu vozidla

Základní rovnice simulačního modelu vozidla uvádí následující přehled:

- a) Rovnice pro podélnou dynamiku vozidla – sestavená na základě Lagrangeových rovnic II. druhu:

$$\begin{aligned}
 m_{red} a &= F_{aer} + G \sin \alpha + \frac{4 M_{val}}{r_w} + \frac{4 M_b}{r_w} - \frac{2 M_h}{r_w} \\
 &= R_{aer} + R_G + R_{roll} + R_{brake} + R_{drive}
 \end{aligned}
 \tag{5.1}$$

ve které vystupuje redukováná hmotnost vozidla m_{red} , zrychlení vozidla a , a jednotlivé jízdní odpory v souladu s definicích jízdních odporů vozidla ve [29]. (R_{aer} odpovídá odporu vzduchu, R_G odpovídá odporu stoupání, R_{roll} odpovídá odporu valení, R_{brake} brzdnému odporu a R_{drive} hnací síle vozidla).

- b) Rovnice ztrátového výkonu motoru – získána na základě regresních funkcí [30]. Její obecný tvar uvádí následující rovnice:

$$\begin{aligned}
 P_{loss M/G} &= \left[A_{0M} + A_{1M} \left(\frac{P_{rel M}}{\omega_{rel}} \right)^{ym1} + A_{2M} \left(\frac{P_{rel M}}{\omega_{rel}} \right)^{ym} + A_{3M} \omega_{rel}^{xm1} \right. \\
 &\quad \left. + A_{4M} \omega_{rel}^{xm} + A_{5M} P_{rel M}^{zm1} + A_{6M} P_{rel M}^{zm} \right] \omega_{rel}^{xg}
 \end{aligned}
 \tag{5.2}$$

ve které vystupují regresní koeficienty A_{kj} a exponenty x_{mj} , y_{mj} a z_{mj} , získané regresí experimentálně získaných charakteristik motoru [30]. Veličiny P_{rel} a ω_{rel} pak značí relativní hodnoty okamžitého odebíraného mechanického výkonu a tomu odpovídající

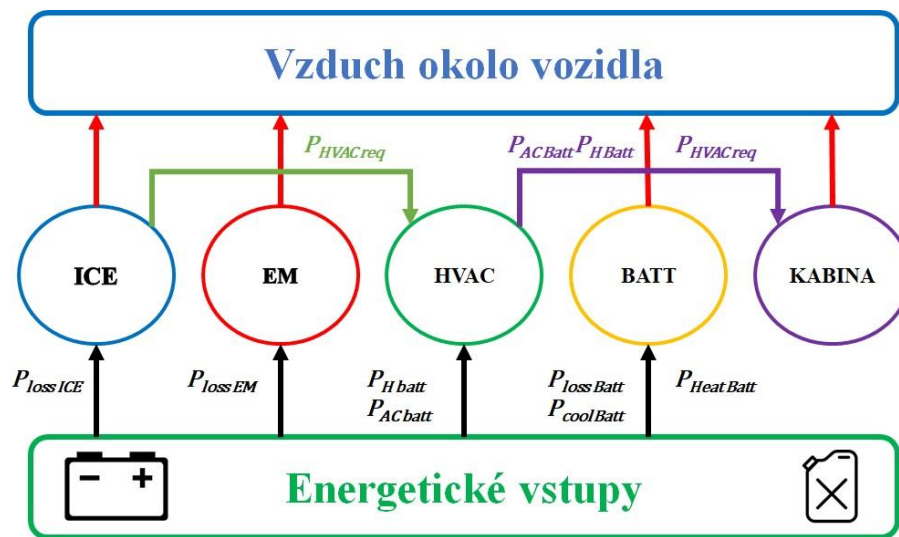
okamžitá úhlová rychlost výstupního hřídele motoru. Obě uvedené relativní hodnoty jsou vztažené k hodnotám nominálním.

- c) Rovnice nabíjení a vybíjení vozidlové baterie vychází z definičního vztahu pro stav nabití vozidlové baterie (SOC) a z modelu baterie složené z ideálního zdroje elektromotorického napětí sériově spojeným s rezistorem vnitřního odporu zdroje. Diferenciální rovnice pro změnu stavu nabití vozidla je dána následujícím tvarem:

$$\frac{d}{dt} S_{oc} = \frac{-I}{C} = \frac{-U_{sv} - \sqrt{U_{sv}^2 - 4 P_e R_{acu}}}{2 R_{acu} C} \quad 5.3$$

Kde t reprezentuje čas, S_{oc} okamžitý stav nabití, I elektrický proud tekoucí baterií, C kapacita baterie, U_{sv} svorkové napětí baterie, P_e okamžitý výkon baterie a R_{acu} okamžitý vnitřní odpor baterie.

Uvažované tepelné okruhy vozidla jsou dány následujícím obrázkem:



Obrázek 7: Schéma tepelných okruhů HEV

Každému tomuto okruhu náleží formálně totožná bilanční diferenciální rovnice pro změnu teploty tělesa motoru, baterie nebo chladicího média. Toky jednotlivých výkonů uvádí Obrázek 7. Obecná diferenciální rovnice pro každý okruh je dána následujícím tvarem:

$$m c_p \frac{dT_t}{dt} = P_{loss} - P_{output} = P_{loss} - k S (T_t - T_{t+1}) \quad 5.4$$

kde m představuje hmotnost tělesa motoru nebo chladicího média, c_p představuje tepelnou kapacitu téhož prvku o okamžité teplotě T_t , t reprezentuje čas, P_{loss} vstupní tepelný výkon prvku, P_{output} výstupní tepelný výkon prvku, k reprezentuje součinitel přestupu tepla, S reprezentuje velikost teplosměnné plochy a T_{t+1} teplotu následujícího prvku soustavy, se kterou tento prvek sdílí tepelnou energii.

Fyzikální modely ostatních agregátů vozidla (vnější osvětlení, rádio apod.) byl omezen pouze na modelování odběru energie z primárního zdroje konstantní hodnotou výkonu.

5.3. Řídící struktura simulačního modelu HEV

Rovnice simulačního modelu vozidla uvádí prostý fyzikální popis vozidla, avšak tyto rovnice zároveň obsahují prvky, které zároveň slouží jako regulační členy vozidla. Příkladem takového prvku je velikost hnací síly R_{drive} v rovnici 5.1. Řídící veličiny vystupující v jednotlivých rovnicích celého simulačního modelu lze obecně rozdělit do dvou skupin. První skupina jsou řídicí veličiny přímo optimalizované (rozdělení hnacích výkonů na jednotlivé motory) a druhá skupina veličin jsou veličiny regulovatelné ve vlastním regulačním okruhu samostatným a nezávislým regulátorem (například regulace teploty v chladicím okruhu motorů).

6. Koncept a provedení optimalizační úlohy

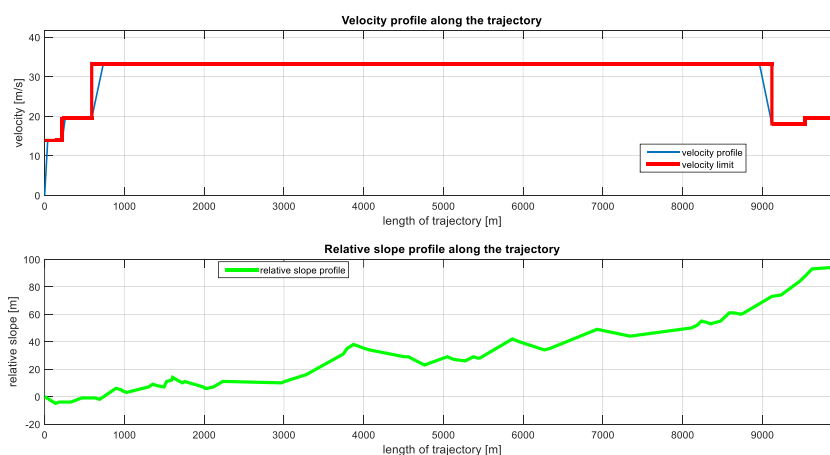
6.1. Definice optimalizační úlohy

Optimalizační úloha dle svého zadání optimalizuje jízdní chování ve dvou úrovních. První úroveň je průběh podélné rychlosti vozidla. Druhou úrovní je přerozdělení hnacích výkonů pro jednotlivé hnací motory [31]. Konstrukce optimalizační úlohy je tedy podřízena nalezení minima spotřeby energie na primárních zdrojích energie (zde zastoupených palivovou nádrží a vozidlovou baterií) [28]. Prvním krokem při návrhu optimalizační úlohy je však rozbor řešitelnosti optimalizační úlohy.

6.2. Rozbor řešitelnosti optimalizační úlohy

První a neopomenutelnou otázkou již při prvotním návrhu optimalizační úlohy, a z toho vycházejícího optimalizačního algoritmu, však je rozbor řešitelnosti a jednoznačnosti řešení této úlohy. Pro úlohu eco-drivingu definovanou cíli disertační práce jsou podmínky řešitelnosti a jednoznačnosti řešení optimalizační úlohy zastoupeny dvojicí sledovaných kritérií. Prvním kritériem je prostá realizovatelnost průjezdu vozidla danou trasou, zaručující existenci řešení optimalizační úlohy. Druhé kritérium pak směřuje již k jednoznačnosti řešení optimalizační úlohy a definuje tak globální extrém celé úlohy.

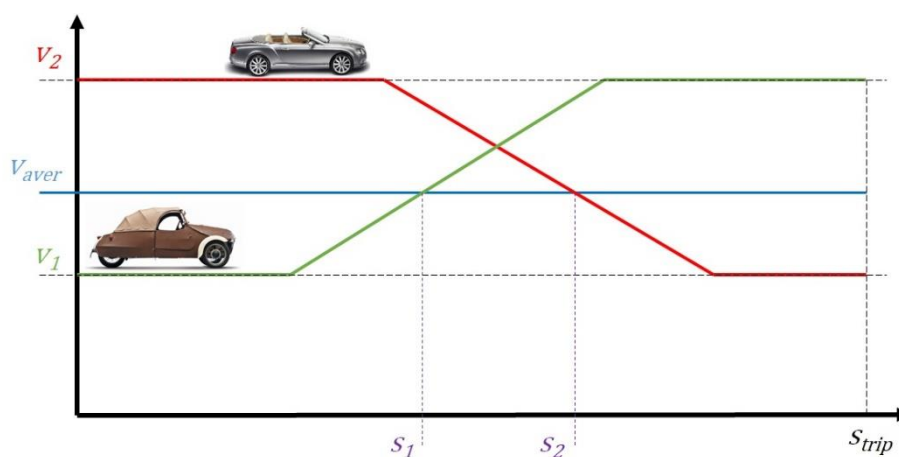
Realizovatelnost průjezdu vozidla danou trasou za daný jízdní čas je nutnou podmínkou pro existenci řešení optimalizační úlohy. Realizovatelností průjezdu vozidla danou trasou rozumíme možnost vozidla projet danou trasu při splnění všech definovaných podmínek, zejména v daném jízdním čase. Realizovatelnost průjezdu je proto dána tzv. „maximálním rychlostním profilem“ vozidla na dané trase. Maximální rychlostní profil vozidla je definován jako rychlostní profil, kterým vozidlo projíždí danou trasu s maximální možnou okamžitou rychlostí. Maximální rychlostní profil tak vychází z maximálního možného zrychlení vozidla, maximálního možného zpomalení vozidla a jízdy konstantní rychlostí na maximální dosažitelní/dovolené hodnotě. Zobrazení maximálního rychlostního profilu uvádí následující obrázek (nahore maximální rychlostní profil, dole průběh stoupání trasy):



Obrázek 8: Mezní rychlostní profil a průběh stoupání jízdní trasy [32].

Maximální rychlostní profil vozidla pak definuje minimální průjezdní čas danou trasou. Minimální průjezdní čas vozidla danou trasou se tak stává kritériem existence řešení optimalizační úlohy. Je-li zvolený limit průjezdního času menší než limit daný maximálním rychlostním profilem, optimalizační úloha nemá žádné řešení. Je-li zvolená hodnota jízdního času přesně rovna minimálnímu průjezdnímu času, má úloha právě jedno řešení. Je-li zvolený jízdní čas větší než minimální dosažitelný, má úloha optimalizace jízdy více než jedno možné řešení.

Prostá existence řešení úlohy optimalizace jízdy vozidla však nezaručuje jeho jednoznačnost. Jednoznačnost řešení pro globální úlohu optimalizace spotřeby energie vozidla je dána tím, zda existuje pouze jeden globální extrém této funkce. Převědeme-li tento problém pro jednoduchost na řešení problému jednoznačnosti existence optimálního rychlostního profilu vzhledem k času průjezdu, pak lze vycházet z následující hypotézy reprezentované následujícím obrázkem:



Obrázek 9: Základní myšlenka hypotézy nalezení více optimálních řešení

Obrázek 9 ukazuje průjezd jedné dané jízdní trasy dvěma vozidly. Každé vozidlo projíždí celou trasu s jiným obecným rychlostním profilem (rychlostní profil jednoho vozidla reprezentuje červená čára, rychlostní profil druhého vozidla reprezentuje zelená čára). Je-li však dán celkový čas průjezdu vozidla danou trasou, pak je také možné nalézt teoretickou hodnotu průměrné rychlosti vozidla na celé jízdní trase (zde reprezentovaná modrou čarou a hodnotou v_{aver}). Okamžitá hodnota rychlosti vozidla by v teoretickém případě mohla plně následovat tuto teoretickou průměrnou hodnotu, čímž by byl zcela dodržen celkový čas jízdy. Skutečný průjezd vozidla danou trasou však musí respektovat rychlostní omezení v jednotlivých bodech jízdní trasy a výkonová omezení vozidla. V některých místech jízdní trasy však mohou nastat případy, ve kterých je hodnota teoretické průměrné rychlosti vyšší než hodnota rychlosti limitní (dané legislativní omezením). V tomto případě, a má-li vozidlo dodržet podmínku času průjezdu, pak musí jet rychlostí vyšší, než je teoretická průměrná v jiných místech jízdní trasy (v místech, která tuto vyšší rychlost umožňují). Z hlediska celkového času průjezdu však je jedno, zda k průjezdu vyšší rychlostí dojde v jedné nebo jiné části jízdní trasy, jsou-li splněny podmínky limitu rychlosti v každém bodě trasy. Tento

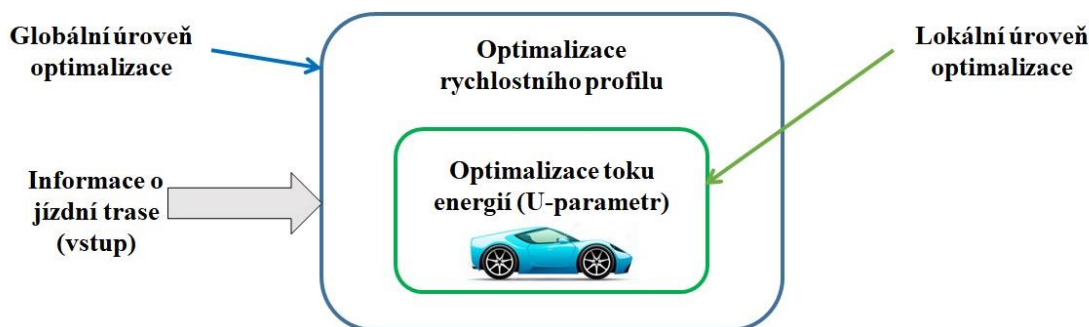
princip právě ilustrují dva rychlostní profily dvou různých vozidel na tomto obrázku. Obrázek 9 tak ukazuje, že je možné nalézt více možných rychlostních profilů s totožnou hodnotou celkového času jízdy. Stejnou úvahu lze provést také pro úlohu rozšířenou z prostého kritéria jízdního času o další vlivy směřující k celkové spotřebě hnací energie vozidla. Důsledkem této rozšířené úlohy pak bude, že je možné nalézt více rozdílných řešení průjezdu vozidla s totožnou hodnotou spotřeby hnací energie (viz kapitola 7).

6.3. Definice cílové funkce optimalizační úlohy

Základní tvar rovnice cílové funkce optimalizace průjezdu vozidla pro definovanou trasu a jízdní rychlostní profil vychází z obecné definice spotřeby energie v následujícím tvaru [33] [31]:

$$E_{source} = \int_{trip} P_{source} dt \quad 6.1$$

Celkový okamžitý výkon P_{source} v této rovnici však zobrazuje pouze výkon na primárních zdrojích energie za uvažovaný čas jízdy (primárními zdroji rozumíme vozidlovou baterii a palivovou nádrž). Celkový okamžitý výkon na primárních zdrojích energie je však funkcí dvou obecně nezávislých prvků optimalizace. Prvním zmíněným prvkem je průběh okamžité rychlosti vozidla. Druhým prvkem pro hybridní vozidla je okamžité přerozdělení hnacích výkonů na jednotlivé motory a na to navazující řízení dalších přidružených agregátů vozidla. V tomto smyslu je také možné celou úlohu optimalizace formálně rozdělit na dvě optimalizační úrovně (viz následující Obrázek 10)



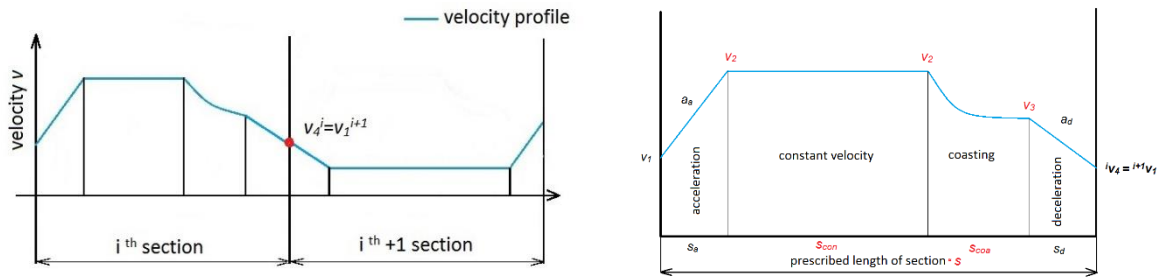
Obrázek 10: Základní schéma rozdělení optimalizace na globální a lokální úroveň

V globální úrovni optimalizační úlohy je optimalizován rychlostní profil vozidla. V lokální úrovni pak přerozdělení hnacích výkonů mezi jednotlivé hnací motory hybridního hnacího agregátu v paralelním uspořádání pomocí tzv. „ U -parametru“.

6.4. Globální úroveň optimalizace

V globální úrovni optimalizační úlohy dochází k optimalizaci rychlostního profilu vozidla. Jak již bylo naznačeno v kapitole věnované jízdní trase, jízdní trasa je rozdělena na menší na sebe navazující jízdní sekce. V těchto sekcích lze proto uvažovat formálně totožný rychlostní profil. Podmínka pro spojitost rychlostního profilu je spojitost průběhu rychlosti

na hranicích sekcí. Tímto způsobem lze sestavit celkový rychlostní profil vozidla, jehož část spolu s lokálním rychlostním profilem v každé sekci uvádí následující obrázek:



Obrázek 11: Sestavený obecný rychlostní profil podél jízdní trasy a lokální rychlostní profil v každé uvažované jízdní sekci

Lokální rychlostní profil v každé jízdní sekci lze obecně parametrizovat různými sadami parametrů [34], které mohou být dále doplněny sadou dalších podmínek. Některé sady parametrů mohou popisovat rychlostní profil v každé jízdní sekci zcela nezávisle, jiné sady parametrů popisují rychlostní profil v sekci relativně vůči některému bodu nebo parametru.

Pro optimalizace provedené v rámci prezentované disertační práce byly použity optimalizační parametry v následujícím tvaru:

$$\text{parametry rychlostního profilu} = [a_a, s_a, s_d, a_d]_{i=1..n} \quad 6.2$$

kde a_a odpovídá hodnotě zrychlení ve fázi zrychlení, s_a odpovídá délce fáze zrychlení, s_d odpovídá délce fáze zpomalení a a_d odpovídá hodnotě decelerace fáze zpomalení. Parametry uvedené v závorce odpovídají parametrům popisu rychlostního profilu v jedné jízdní sekci. Sestavením parametrů všech lokálních rychlostních profilů do jednoho vektoru je získán parametrický popis rychlostního profilu podél celé jízdní dráhy. Tyto parametry zároveň odpovídají optimalizačním parametrům v globální úrovni optimalizační úlohy.

6.5. Lokální úroveň optimalizace

Lokální úroveň optimalizace optimalizuje pro pevně daný rychlostní profil vozidla přerozdělení hnacích výkonů na jednotlivé motory HEV. Přerozdělení hnacích výkonů na jednotlivé hnací motory je dáno pomocí U -parametru, který je definován následující dvojicí rovnic:

$$P_{EM\ mech} = \frac{1}{\eta_{gear}} (1 - U_{(t)}) P_W \quad 6.3$$

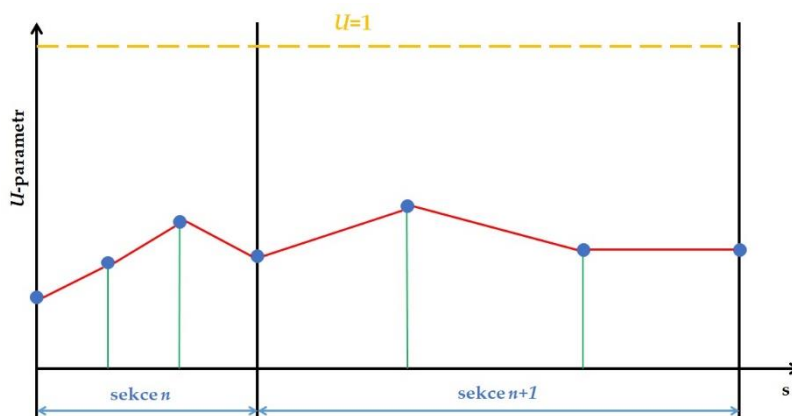
$$P_{ICE\ mech} = \frac{1}{\eta_{gear}} U_{(t)} P_W \quad 6.4$$

kde $P_{EM\ mech}$ odpovídá mechanickému výkonu odebranému z elektromotoru, $P_{ICE\ mech}$ odebranému mechanickému výkonu ze spalovacího motoru a P_W mechanickému výkonu na vozidlových kolech.

Parametr $U(t)$ vztažený k okamžitému hnacímu výkonu na kolech zjevně nabývá hodnot z následujícího intervalu:

$$U(t) \in (0,1) \quad 6.5$$

Z definice U -parametru je patrné, že podél celé jízdní dráhy může nabývat libovolné hodnoty z uvedeného intervalu, pouze s omezením daným okamžitým dostupným výkonem jednotlivých hnacích motorů. Obecně je tak možné sestavit jakoukoli křivku přerozdělení hnacích výkonů vztaženou k jízdní dráze, jejíž každý bod bude ležet v intervalu daném rovnicí 6.5. Takových křivek je možné sestavit nekonečně mnoho a to až v závislosti na rozdělení celé jízdní trasy na sekce nebo zcela nezávisle. Pro diskretizaci křivky U -parametrů je ovšem výhodné zvolit hustotu bodů křivky U -parametrů v každé sekci konstantní. Tímto způsobem je pak získána síť bodů popisujících tuto křivku, která je vůči celkové jízdní dráze tvořena sítí s proměnnou hustotou sítě, avšak totožná lokální hustota sítě odpovídá účelu optimalizace lépe [27]. Tvorbu sítě U -parametrů uvádí následující obrázek:



Obrázek 12: Tvorba křivky přerozdělení hnacích výkonů motorů

Celou křivku přerozdělení hnacích výkonů podél jízdní trasy reprezentuje soustava U -parametrů pro všechny zúčastněné sekce. Tato soustava parametrů je zároveň soustavou optimalizačních parametrů lokální úrovně optimalizační úlohy.

Optimalizace v lokální úrovni optimalizační úlohy může být provedena buď pro celý soubor optimalizačních parametrů, avšak vzhledem k charakteru optimalizační úlohy přerozdělení hnacího výkonu a malému počtu uvažovaných optimalizačních parametrů je možné uvažovat i optimalizaci lokální úrovně po částech. Výpočetní optimalizace pak bude probíhat pro každou jízdní sekci zvláště a s jistým zjednodušením bude možné použít i lokální optimalizační algoritmy. Ukázka výpočtu touto metodou je uvedena v kapitole 7.

6.6. Použité optimalizační algoritmy

Úplná úloha optimalizace obecně vyhledává globální minimum spotřeby hnací energie vozidla na primárních zdrojích (vozidlová baterie a palivová nádrž). Pro tyto úlohy by bylo nutné použít optimalizační algoritmy hledající globální extrém funkce. S určitou mírou zjednodušení a vzhledem k charakteru jednotlivých úrovní celé optimalizační úlohy je možné

v některých případech použití i algoritmů hledajících lokální minimum funkce, případně vyhledávání globálního optima hybridní technologií kombinace globálního algoritmu v první fázi a lokálního algoritmu v následné fázi. V rámci prezentované disertační práce byly na obě úrovně optimalizační úlohy testovány optimalizační algoritmy lokálního i globálního optima integrované ve funkcích „*ga*“, „*fminsearch*“ a „*fmincon*“, implementovaných v programovém prostředí Matlab-Simulink. Detailní popis testování jednotlivých metod na jednotlivé úrovně optimalizace jsou popsány v disertační práci, některé vybrané úlohy jsou prezentovány i v následující kapitole 7.

7. Výsledky z použití optimalizačního algoritmu

V rámci prezentované dizertační práce byly provedeny testovací výpočty samostatně na obou úrovních optimalizační úlohy i na celé optimalizační úloze. Průběžně byly testovány různé optimalizační algoritmy, různá nastavení limitních parametrů optimalizace aj. Následující prezentované výsledky jsou pouze velmi úzkým výběrem z celého souboru provedených výpočtů. Každý výpočet v následující kapitole je popsán samostatným popisem a to ať ve smyslu nastavení parametrů optimalizace, tak výstupům optimalizace.

7.1. Referenční jízdní trasa a referenční vozidlo

Referenční jízdní trasa byla zpracována pomocí algoritmu představeného v kapitole 4 a odpovídá jí půdorysný průmět, který zobrazuje Obrázek 5 na straně 12. Celkový počet jízdních sekcí na dané trase je 42 a ukázkou definice několika jízdních sekcí ukazuje následující tabulka:

číslo sekce	ID manévru	délka sekce [m]	maximální rychlost v sekci [m/s]	převýšení v sekci [m]	teplota vzduchu [°C]
1	1	178,2	17,2	0,0	20,0
2	-1	28,9	18,6	0,6	20,0
3	0	76,4	24,6	0,3	20,0
4	-1	110,4	14,0	0,3	20,0
5	1	147,4	8,7	0,4	20,0

Tabulka 1: Parametry jednotlivých jízdních sekcí

Referenční vozidlo odpovídá zvolené koncepci hnacího agregátu HEV v paralelním uspořádání a jeho základní parametry uvádí následující tabulka:

výkon EM [kW]	výkon ICE [kW]	kapacita baterie [kWh]	hmotnost vozidla [kg]
80	100	10	1027
hmotnost nákladu [kg]	počet převodových stupňů [-]	napětí baterie [V]	čelní plocha [m ²]
100	6	400	2,1

Tabulka 2: Číselné parametry referenčního vozidla

7.2. Ověření funkce lokální úrovně optimalizace

Ověření lokální úrovně optimalizace bylo provedeno pro různé jízdní dráhy a různé optimalizační algoritmy. Níže budou prezentovány dva přístupy.

Prvním přístupem byla optimalizace pomocí optimalizačního algoritmu vyhledávajícího globální minimum funkce (*ga*). Ověření proběhlo pro celou jízdní trasu a nastavení optimalizačních podmínek dle následující tabulky:

parametr	hodnota
<i>MaxTime</i>	10 800 s (3h)
<i>PoulationSize</i>	200

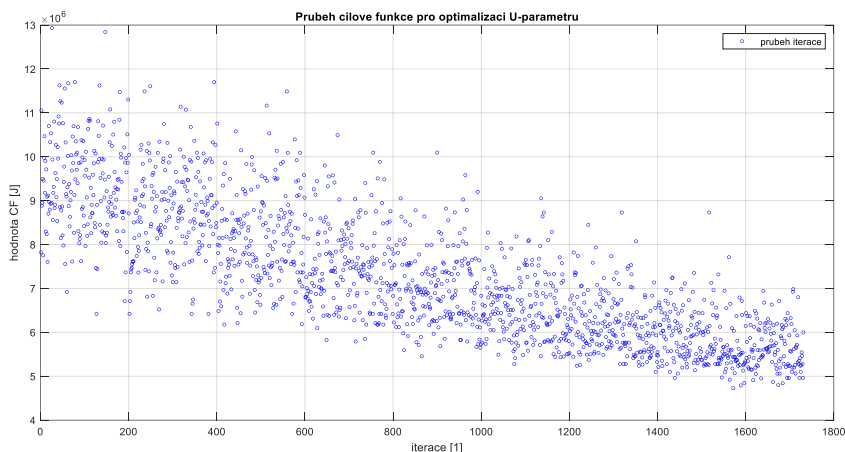
Tabulka 3: Hodnoty nastavení lokální optimalizace pomocí funkce *ga*

Ostatní parametry optimalizační metody byly ponechány v defaultním nastavení (konečným kritériem pro ukončení optimalizace bylo překonání nastaveného limitu času optimalizace).

Optimalizovaná hodnota cílové funkce byla dána následující hodnotou:

$$E_{source} = 4,726 \cdot 10^6 J$$

Průběh optimalizace lokálního stupně optimalizační je uveden na následujícím obrázku.



Obrázek 13: Průběh optimalizace lokálního stupně pomocí funkce *ga*

Druhým ověřovaným přístupem je přístup optimalizace lokální úrovně po částech (po sekcích). Ověřovací optimalizace probíhala pro stejnou trasu jako ověření pomocí funkce *ga*, avšak zde byl použit optimalizační řešitel *fmincon* s následujícím nastavením:

argument nastavení	hodnota
<i>MaxIter</i>	400
<i>MaxFunEval</i>	400
<i>TolFun</i>	10e-3
<i>TolX</i>	10e-3

Tabulka 4: Hodnoty nastavení metody *fmincon* pro optimalizaci po částech

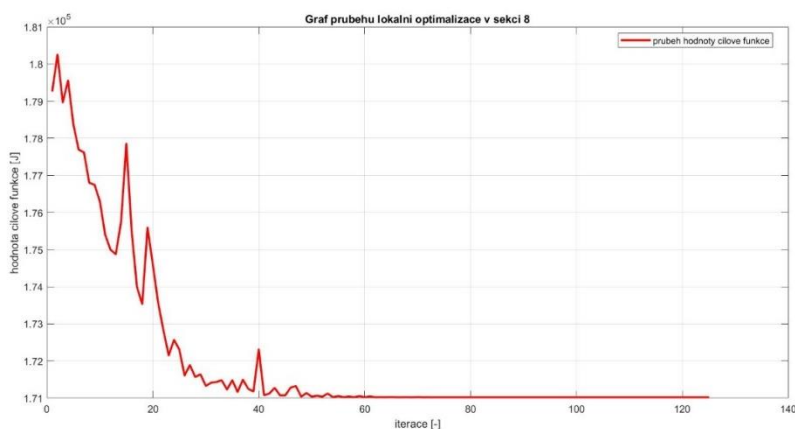
Ukázku řešení pro některé sekce uvádí následující tabulka:

číslo sekce	největší hodnota cílové funkce [J] ($\max CF$)	nejmenší hodnota cílové funkce [J] ($\min CF$)	procentuální maximální změna [%] ($P_{diference}$)	počet provedených evaluací funkce [1]
1	450073	279757	37,8	399
2	22188	12316	44,5	156
3	45628	40122	12,1	280
4	113229	104967	7,3	177
5	561815	214593	61,8	274
6	306827	190465	37,9	205
7	343797	5881	98,3	168
8	180256	171021	5,1	124

$$P_{diference} = \frac{\max CF - \min CF}{\max CF} \cdot 100$$

Tabulka 5: Numerické výsledky ověření lokální optimalizační úrovně

Průběh optimalizace pro sekci číslo 8 uvádí následující obrázek:



Obrázek 14: Průběh lokální optimalizace v sekci č. 8

Optimalizovaná hodnota cílové funkce nabývala následující hodnoty:

$$E_{source} = 3,070 \cdot 10^6 J$$

7.3. Ověření globální úrovně optimalizace

Ověření globální úrovně optimalizace proběhlo pomocí funkce *ga* s následujícím nastavením:

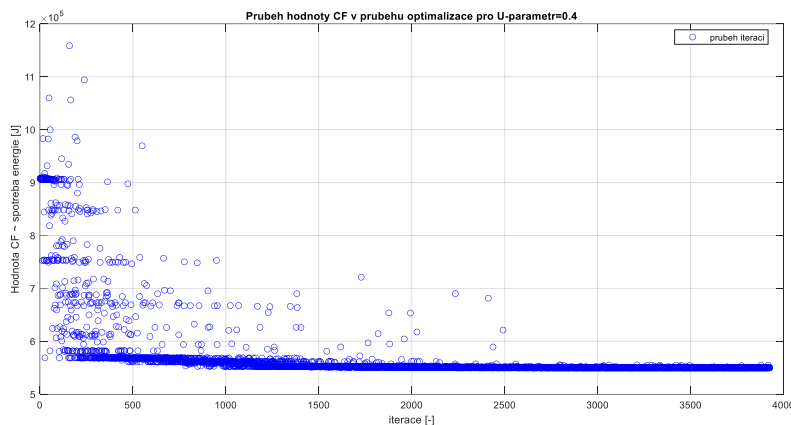
parametr	hodnota
<i>MaxTime</i>	10 800 s (3 h)

PopulationSize

200

Tabulka 6: Nastavení parametrů algoritmu globální úrovně optimalizace pomocí funkce „optimoptions“

Ověřovací výpočet probíhal pro část jízdní trasy dané sekcemi 7 až 15. Vzhledem k validaci hodnot spotřeby energie bylo zvoleno přerozdělení hnacích výkonů na konstantní hodnotu 0,4 podél celé uvažované jízdní dráhy. Průběh optimalizace ukazuje následující obrázek:

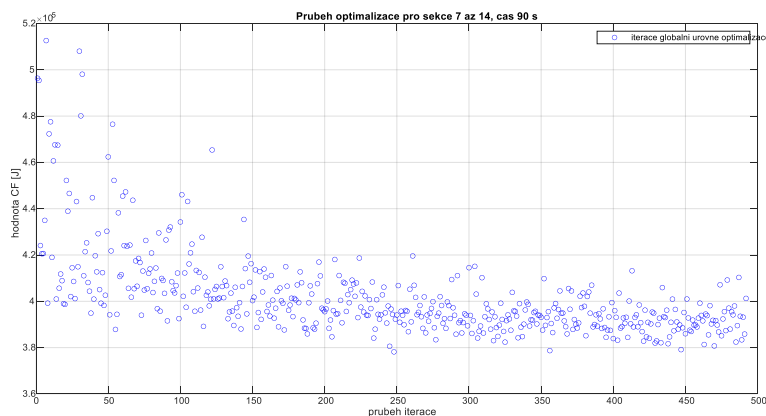


Obrázek 15: Zobrazení jednotlivých členů populace globální optimalizační metody pro nastavení U -parametru $U=0,4$.

Všechny uvedené příklady optimalizace v jednotlivých úrovních vykazují výrazně konvergentní chování.

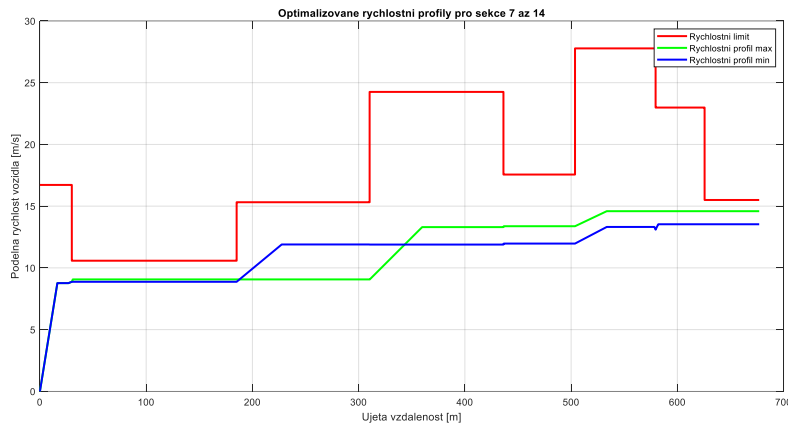
7.4. Ověření funkce celé optimalizační úlohy

Jedním z provedených ověřovacích výpočtů pro celou úlohu optimalizace bylo řešení úlohy optimalizace na trase definované sekcemi 7 až 14. Optimalizace jízdy na této trase byla provedena tak, že v každém iteračním kroku globální optimalizační metody byla provedena optimalizace i v lokální úrovni. Globální úroveň optimalizace byla prováděna optimalizačním řešiče *ga*, lokální úroveň optimalizace probíhala metodou optimalizace po částech. Průběh hodnot cílové funkce v závislosti na výpočetních iteracích globální úrovně uvádí Obrázek 16.

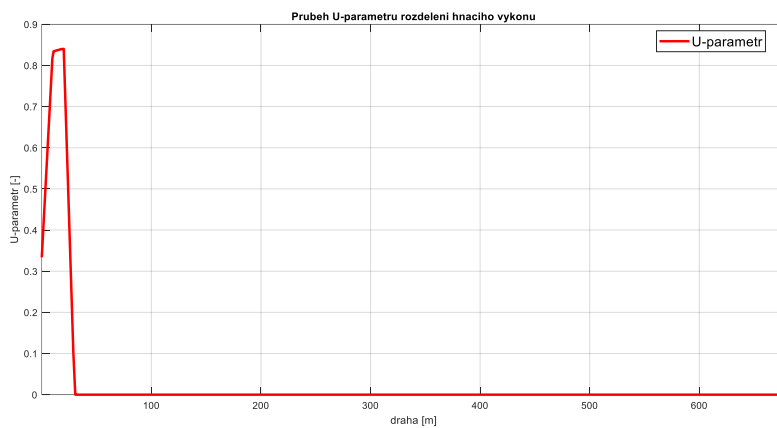


Obrázek 16: Průběh globální úrovně optimalizace pro trasu danou sekcemi 7 až 14 (lokální optimalizace provedena po částech) – čas jízdy 90 s

Této optimalizaci odpovídal rychlostní profil uvedený na Obrázek 17. Přerozdělení U -parametru pak uvádí Obrázek 18.



Obrázek 17: Rychlostní profily pro optimalizaci v sekcích 7 až 14 (čas jízdy 90 s)



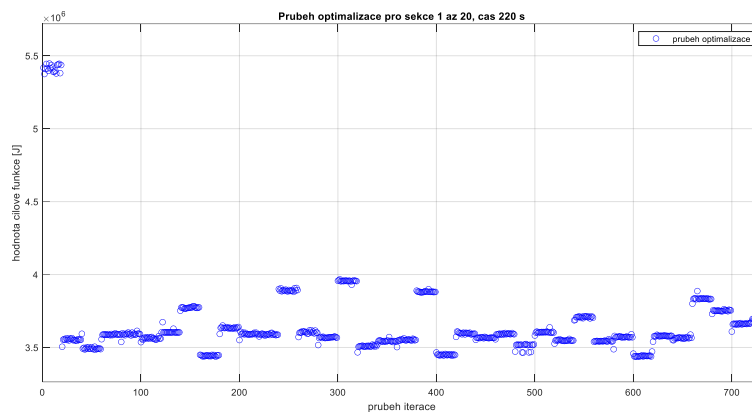
Obrázek 18: Přerozdělení hodnot U -parametru pro trasu danou sekcemi 7 až 14 (čas jízdy 90 s)

Obrázek 17 zobrazuje dva rychlostní profily, jejichž hodnota cílové funkce se neliší více jak o 1 %. Výrazně odlišné rychlostní profily jsou praktickou ukázkou důsledku úvahy uvedené v kapitole 6.2. V rámci řešení této úlohy byly nalezeny dvě výrazně rozdílná řešení téže úlohy s prakticky totožnou hodnotou cílové funkce.

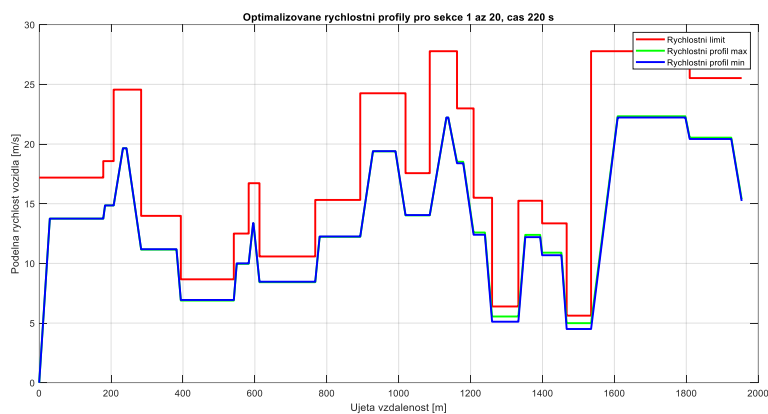
7.5. Modifikace optimalizačního algoritmu celé úlohy

Výsledky předchozí úlohy ukazují v druhé fázi již jen pozvolný průběh konvergence (viz Obrázek 16), avšak celá úloha vykazuje vysokou náročnost na výpočetní prostředky. V rámci zmenšení výpočetních nároků na výpočet celého optimalizačního balíčku byla navržena modifikace optimalizačního procesu. Modifikace spočívá ve výpočtu lokální úrovně nikoli v každém kroku výpočtu globální úrovně, avšak jen ve vybraných krocích (například pro každé 15. volání cílové funkce globální úrovně). Tato modifikace byla testována například pro jízdní trasu tvořenou sekcemi 1 až 20 a celkový čas jízdy 220 s. Celkový čas optimalizačního výpočtu byl nastaven na hodnotu 7200 s (odpovídá 2 h). Průběh

optimalizace, průběh rychlosti a optimalizované přerozdění hnacích výkonů pomocí U -parametru je uvedeno na následujících obrázcích.



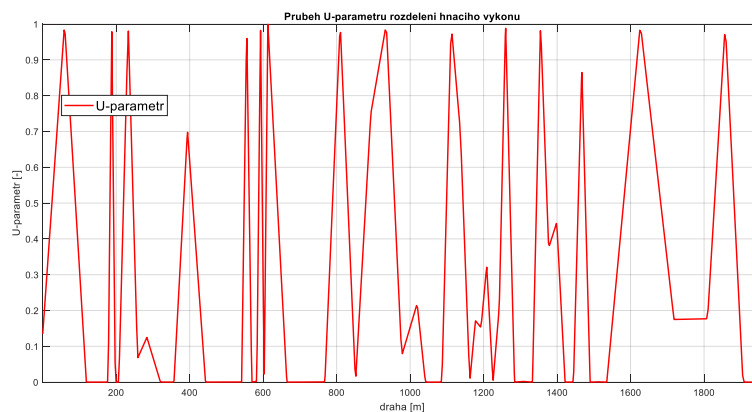
Obrázek 19: Průběh optimalizace pro trasu danou sekcemi 1 až 20, čas jízdy 220 s



Obrázek 20: Optimalizované rychlostní profily pro trasu danou sekcemi 1 až 20, čas jízdy 220 s

Optimalizovaná hodnota spotřeby hnací energie na primárních zdrojích je dána následující hodnotou:

$$E_{source} = 3,436 \cdot 10^6 J$$



Obrázek 21: Přerozdění hnacích výkonů pro trasu danou sekcemi 1 až 20 a čas jízdy 220 s

Obrázek 19 ukazuje prakticky dva fenomény. První fenomén jsou shluky bodů s přibližně totožnou hodnotou cílové funkce, které odpovídají skutečné optimalizaci lokálního stupně pouze v každé patnácté evaluaci cílové funkce globální úrovně. Druhý fenomén odpovídá vlastnímu průběhu optimalizace, která vykazuje výrazné zlepšení hodnoty cílové funkce pouze v první (levé) části grafického zobrazení. Optimální řešení tak bylo nalezeno prakticky okamžitě. Tomuto fenoménu odpovídá specifické zadání úlohy optimalizace. Obrázek 20 ukazuje opět dvojici optimalizovaných rychlostních profilů pro prakticky totožné hodnoty cílové funkce. Průběh optimalizovaného rychlostního profilu se však velmi blíží obálce maximálního rychlostního profilu. Původcem této skutečnosti je nastavení limitu jízdního času poblíže minimální dosažitelné hodnoty času jízdy. Prostor parametrů globální úrovně optimalizace je tak velmi zúžený a všechny přípustné optimalizované rychlostní profily budou v blízkém okolí maximálního rychlostního profilu. V globální úrovni optimalizace pak je řešení nalezeno velmi rychle a k němu je zároveň velmi rychle nalezeno jednoznačné řešení i lokální úrovně optimalizace.

8. Závěr

Disertační práce byla primárně zaměřena na vytvoření optimalizační metody, která bude umožňovat optimalizaci jízdního chování vozidla s hybridním pohonem na stanovené jízdní dráze ve smyslu cílů uvedených v kapitole 3.

Prvním cílem, přímo vycházejícím z konstrukce optimalizačního algoritmu, byl návrh popisu jízdní trasy použitelný pro sestavení cílové funkce optimalizace. V kapitole 4 proto byla navržena, sestavena a odzkoušena metoda popisu jízdní dráhy založená na rozdělení celé dráhy do menších sekcí dle některých klíčových parametrů pomocí plánovače trasy. Výstupem z tohoto plánovače trasy je soustava dat definující jednotlivé jízdní sekce bez závislosti na znalosti parametrů vozidla (příklad takového rozdělení trasy na sekce uvádí Tabulka 1).

Druhým cílem a zároveň dalším milníkem v konstrukci optimalizační úlohy je návrh vlastní optimalizační metody pro úlohu nalezení minima spotřeby energie primárních zdrojů vozidla. Celý návrh vychází ze zvolené koncepce hnacího agregátu hybridního vozidla a možností řízení toků energie mezi těmito motory i dalšími agregáty vozidla. Úplnou optimalizační úlohu je pak možné rozdělit do dvou úrovní optimalizace. První tzv. „globální“ úroveň optimalizuje podélnou dynamiku vozidla zastoupenou rychlostním profilem vozidla při jízdě podél zvolené jízdní dráhy. Druhá tzv. „lokální“ úroveň optimalizace hledá pro daný rychlostní profil z nadřazené globální úrovně optimalizačního algoritmu optimální rozdělení hnacího výkonu na jednotlivé motory a zároveň toky energií ostatními agregáty. Detailní popis celé optimalizační metody je uveden v kapitole 6.

Třetí cíl dizertační práce naplňuje sestavení matematického modelu hybridního vozidla se zvoleným konceptem zapojení jednotlivých hnacích motorů. Simulační model celého vozidla byl sestaven na základě propojení fyzikálních modelů jednotlivých zúčastněných agregátů a vozidlové baterie, spolu s pohybovou rovnicí vozidla v podélném směru. Celý simulační model vozidla byl složen ze smyčky definující mechanický přenášený výkon a ze smyčky pracující s tepelným výkonem mezi jednotlivými agregáty vozidla (viz Obrázek 6). Zvláštní důraz při konstrukci simulačního modelu byl věnován energetickému propojení všech agregátů a to pro energie elektrické i tepelné a zejména jejich vzájemně propojené regulaci. Propojení všech agregátů elektrickou a tepelnou smyčkou ve vozidle i matematickém modelu umožňuje využít všech možností rekuperace energií, ať už generovaných v elektrickém agregátu nebo ztrátových tepelných energií. Detailní popis matematického modelu vozidla užitého pro následnou konstrukci cílové funkce uvádí kapitola 5.

Čtvrtým a zároveň posledním cílem této dizertační práce je provedení ověřovacích výpočtů optimalizací na několika zvolených jízdních drahách a za použití různých nastavení parametrů optimalizace. Výpočty byly provedeny pro různá nastavení optimalizačních algoritmů, pro různé jízdní dráhy a jejich výsledky byly vzájemně porovnány. V rámci tohoto porovnání byl sledován nejen vliv konstrukce a nastavení celého optimalizačního balíčku na

průběh konvergence optimalizace, ale také citlivost jednotlivých úrovní optimalizace vůči konečné spotřebě energie (a to i v závislosti na specifických vlastnostech každé úlohy). Na základě původně navržené metody a v souladu s ověřovacími výpočty byla optimalizační metoda dále modifikována. Uvedená modifikace je detailně popsána v kapitole 7.5, nicméně celá kapitola 7 obsahuje výsledky optimalizací pro různé trasy. Příklady optimalizací na různých trasách dále ukazují, že je možné pro všechny trasy používat obecně totožný optimalizační algoritmus, avšak pro jeho úspěšné použití je velmi vhodné také sledovat specifika každé optimalizované úlohy a tomu následně přizpůsobovat nastavení optimalizačního algoritmu.

V úplném závěru lze konstatovat, že byl sestaven optimalizační algoritmus ve smyslu výše uvedených cílů disertační práce. Klíčovým prvkem této disertační práce v porovnání se současným stavem poznání bylo použití simulačního modelu vozidla rozšířeného o fyzikální modely dalších agregátů vozidla. Tímto způsobem bylo dosaženo použití realističtějšího modelu vozidla pro optimalizaci jeho jízdy, který nezohledňuje pouze vlastnosti hnacího agregátu ve vztahu k podélné dynamice vozidla, ale také ve vztahu k dalším agregátům vozidla. Ve svém důsledku se tato cesta ukázala jako vhodná pro současný i budoucí vývoj obdobných optimalizačních úloh, čehož příkladem mohou být již realizované a právě realizované evropské výzkumné projekty s názvy IMPROVE a ADVICE. Na základě tohoto rozšíření byl sestaven celý optimalizační algoritmus, který byl testován na různých trasách a vykazoval dobré výsledky výpočtu zejména ve vztahu k rychlosti konvergence. Problematickým prvkem se však jeví výpočetní náročnost celé úlohy, která je úměrná rozšíření matematického modelu vozidla. Zvýšení efektivity numerického výpočtu optimalizační úlohy by proto mělo být dalším krokem ve vývoji a výzkumu této optimalizační úlohy, který ve svém důsledku také umožní použití ještě složitějšího simulačního modelu vozidla. Pro budoucí výzkum se však nezávisle nabízí možnost adaptace tohoto optimalizačního algoritmu pro další konstrukce hybridních hnacích agregátů, které v této disertační práci nebyly uvažovány.

9. Literatura

9.1. Použitá literatura

- [1] B. Dahou, „Fuel Estimation Model for ECO-Driving and ECO-Routing,“ v *2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Baden-Baden, 2011.
- [2] S. Thaned, S. Atthapol a R. Thana, „Development of On-Road Exhaust Emission and Fuel Consumption Models for Motorcycles and Application through Traffic Microsimulation,“ *Journal of Advanced Transportation*, p. 10, 2017.
- [3] W. Dib, A. Chasse, P. Moulin, A. Sciarretta a G. Corde, „Optimal energy management for an electric vehicle in eco-driving applications,“ *Control Engineering Practice*, pp. 299-307, 08 2014.
- [4] H. Koch-Groeber a J. Wang, „Criteria for Coasting on Highways for Passenger Cars,“ *SAE Technical Paper 2014-01-1157*, 04 01 2014.
- [5] R. P. Godavarthy, E. Russell a D. Landman, „Using vehicle simulations to understand strategies for accommodating oversize, overweight vehicles at roundabouts,“ *Transportation Research Part A*, sv. 87, č. 1, pp. 41-55, 05 2016.
- [6] C. Mi a A. Masrur, *Hybrid Electric Vehicle Principles and Applications with Practical Perspectives*, John Wiley & Sons Ltd ISBN 9781118970539, 2018.
- [7] E. Paffumi, M. De Gennaro a G. Martini, „Experimental Test Campaign on a Battery Electric Vehicle: On-Road Test Results (Part 2),“ *SAE International Journal of Alternative Powertrains - 2015-01-1166*, 14 04 2015.
- [8] F. Orecchini a A. Santiangeli, *Electric and Hybrid Vehicles* ISBN: 9780444638250, Elsevier, 2010.
- [9] C. Yi, B. I. Epureanu, S.-K. Hong, T. Ge a X. G. Yang, „Modeling, control, and performance of a novel architecture of hybrid electric powertrain system,“ *Applied Energy*, sv. 178, č. 1, pp. 454-467, 15 09 2016.
- [10] J. Liu a H. Peng, „Modeling and Control of a Power-Split Hybrid Vehicle,“ *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, sv. 16, č. 6, pp. 1242-1251, 11 2008.

- [11] C. Vagg, C. Brace a D. Hari, „A Driver Advisory Tool to Reduce Fuel Consumption,“ *SAE Technical paper 2012-01-2087*, 10 03 2013.
- [12] S. M. Vedula a N. K. Pandey, „Novel Approach for Model-Based Development - Part I: Developin a Real-World Driver Model,“ *SAE Technical Paper 2016-01-0323*, 05 04 2016.
- [13] Google, „Google Maps Platform,“ [Online]. Available: <https://developers.google.com/maps/>. [Přístup získán 14 03 2017].
- [14] T. Lee a J. Son, „Relationships between Driving Style and Fuel Consumption in Highway Driving,“ *SAE Technical Paper 2011-28-0051*, 2011.
- [15] H. Hu, X. Zhou a Z. Zhu, „A Driving Simulator Study of Young Driver's Behavior under Angry Emotion,“ *SAE Technical Paper 2019-01-0398*, 02 04 2019.
- [16] Nokia, „Navigation system Nokia HERE,“ 27 02 2017. [Online]. Available: www.nokiahere.com/en. [Přístup získán 27 02 2017].
- [17] V. Milanes, J. Villagra, J. Godoy, J. Simo, J. Perez a E. Onieva, „An Intelligent V2I-Based Traffic Management System,“ *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, sv. 13, č. 1, pp. 49-58, 03 2012.
- [18] J. Thota, N. F. Abdullah, A. Doufexi a S. Armour, „V2V for Vehicular Safety Applications,“ *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, pp. 1-15, 26 06 2019.
- [19] K. C. Dey, A. Rayamajhi, M. Chowdhury, P. Bhavsar a J. Martin, „Vehicle-to-vehicle (V2V) and vehicle-to-infrastructure (V2I) communication in a heterogeneous wireless network –Performance evaluation,“ *Transportation Research Part C*, sv. 68, č. 1, pp. 168-184, 07/ 2016.
- [20] D. Trucks, „DAF - Predictive Cruise Control,“ [Online]. Available: www.daf.global.com. [Přístup získán 16 04 2017].
- [21] Porsche, „Porsche InnoDrive system – official website: www.porsche.com,“ [Online]. Available: <http://www.porsche.com/international/models/panamera/panamera/assistance-systems/porsche-innodrive/>. [Přístup získán 27 02 2017].

- [22] A. Mohammad, C. Joshua a A.-M. Essam, „Look-Ahead Information Based Optimization Strategy for Hybrid Electric Vehicles,“ *SAE Technical Paper 2016-01-2226*, 16 10 2016.
- [23] M. S. a. H. Z. Ting Jun Li, „Overtaking or Merging? Eco-Routing Decision and Speed Trajectory with Full Terrain Information,“ *SAE Technical paper 2018-01-0038*, 03 04 2018.
- [24] A. Pam, A. Bouscayrol a P. Fiani, „Integration of the Road Slope in the Optimization of the Energy Management Strategy of a parallel HEV,“ *IFAC PapersOnLine*, sv. 52, č. 5, pp. 28-33, 2019.
- [25] P. Denk, P. Steinbauer, Z. Šika, J. Macek, J. Morkus a L. Švamberová, „The New Approach for Vehicle Behavior Optiomization Bases on Vehicle Route Knowledge,“ v *20th Workshop of Applied Mechanics - Book of papers - ISBN 978-80-01-05975-3*, Praha, 2016.
- [26] P. Denk, P. Steinbauer, Z. Šika, J. Macek a J. Morkus, „ROUTE SEGMENTATION DESIGNED FOR OPTIMIZATION OF THE VEHICLE BEHAVIOR AND CONTROL BY THE ADAPTIVE CRUISE CONTROL,“ v *21st Workshop of Applied Mechanics - Proceedings ISBN 978-80-01-06085-8*, Praha, 2016.
- [27] P. Denk, Z. Šika, P. Steinbauer, J. Macek a J. Morkus, „THE OPTIMIZATION OF RIDING VEHICLE BEHAVIOR BASED ON THE ADAPTIVE ROUTE DESCRIPTION,“ v *22nd Workshop of Applied Mechanics - Book of Papers ISBN 978-80-01-06170-1*, Praha , 2016.
- [28] P. Denk, Z. Šika, P. Steinbauer, M. J. a J. Morkus, „Mathematical model of the Hybrid Electric Vehicle for driving consumption optimization,“ v *33rd CONFERENCE WITH INTERNATIONAL PARTICIPATION Computational Mechanics 2017, ISBN 978-80-261-0748-4*, Špičák, 2017.
- [29] F. Vlk, *Teorie vozidel - Automobily*, Brno: VUT Brno, 1985.
- [30] J. Macek a J. Morkus, „Optimum Limits of Motor Vehicle Driving,“ *KOKA 2017 - XLVIII. mezinárodní vědecká konference českých a slovenských univerzit a institucí zabývajících se výzkumem motorových vozidel a spalovacích motorů.*, pp. 111 - 124, 2017.
- [31] P. Steinbauer, J. Macek, J. Morkus, P. Denk, Z. Šika a F. Pasteur, „Aspects for Velocity Profile Optimization for Fleet Operated Vehicles,“ *Comprehensive Energy*

Management – Eco Routing & Velocity Profiles ISBN 978-3-319-53165-6, pp. 1-18, 18 04 2017.

- [32] P. Denk, P. Steinbauer, Z. Šika, J. Macek a J. Morkus, „Discretization and parameterization of route description for velocity profile optimization of vehicle,“ v *Computational Mechanics 2015 ISBN 978-80-261-0568-8*, Špičák, 2015.
- [33] P. Denk, Z. Šika, P. Steinbauer, J. Macek a J. Morkus, „THE DETAILED VIEW ON THE HYBRID ELECTRIC VEHICLE MATHEMATICAL MODEL USED FOR ENERGY CONSUMPTION OPTIMIZATION,“ v *24th Workshop of Applied Mechanics ISBN 978-80-01-06453-5*..
- [34] P. Steinbauer, P. Denk, J. Macek, J. Morkus a Z. Šika, „E-vehicle energy consumption optimization based on fleet and infrastructure information,“ v *JABLONSKI, R. J. a T. BREZINA, eds. Advanced Mechatronics Solutions ISBN 978-3-319-23921-7*, Cham, 2015.
- [35] P. Steinbauer, J. Macek, J. Morkus, P. Denk, Z. Šika a A. Barák, „Dynamic Optimization of the E-Vehicle Route Profile,“ *SAE Technical Paper 2016-01-0156*, 05 04 2016.

9.2. Publikace autora vztahující se k disertační práci

- [25] P. Denk, P. Steinbauer, Z. Šika, J. Macek, J. Morkus a L. Švamberová, „The New Approach for Vehicle Behavior Optimization Bases on Vehicle Route Knowledge,“ v *20th Workshop of Applied Mechanics - Book of papers - ISBN 978-80-01-05975-3*, Praha, 2016.
- [26] P. Denk, P. Steinbauer, Z. Šika, J. Macek a J. Morkus, „ROUTE SEGMENTATION DESIGNED FOR OPTIMIZATION OF THE VEHICLE BEHAVIOR AND CONTROL BY THE ADAPTIVE CRUISE CONTROL,“ v *21st Workshop of Applied Mechanics - Proceedings ISBN 978-80-01-06085-8*, Praha, 2016.
- [27] P. Denk, Z. Šika, P. Steinbauer, J. Macek a J. Morkus, „THE OPTIMIZATION OF RIDING VEHICLE BEHAVIOR BASED ON THE ADAPTIVE ROUTE DESCRIPTION,“ v *22nd Workshop of Applied Mechanics - Book of Papers ISBN 978-80-01-06170-1*, Praha, 2016.

- [28] P. Denk, Z. Šika, P. Steinbauer, M. J. a J. Morkus, „Mathematical model of the Hybrid Electric Vehicle for driving consumption optimization,“ v *33rd CONFERENCE WITH INTERNATIONAL PARTICIPATION Computational Mechanics 2017*, ISBN 978-80-261-0748-4, Špičák, 2017.
- [31] P. Steinbauer, J. Macek, J. Morkus, P. Denk, Z. Šika a F. Pasteur, „Aspects for Velocity Profile Optimization for Fleet Operated Vehicles,“ *Comprehensive Energy Management – Eco Routing & Velocity Profiles* ISBN 978-3-319-53165-6, pp. 1-18, 18 04 2017.
- [32] P. Denk, P. Steinbauer, Z. Šika, J. Macek a J. Morkus, „Discretization and parameterization of route description for velocity profile optimization of vehicle,“ v *Computational Mechanics 2015* ISBN 978-80-261-0568-8, Špičák, 2015.
- [33] P. Denk, Z. Šika, P. Steinbauer, J. Macek a J. Morkus, „THE DETAILED VIEW ON THE HYBRID ELECTRIC VEHICLE MATHEMATICAL MODEL USED FOR ENERGY CONSUMPTION OPTIMIZATION,“ v *24th Workshop of Applied Mechanics* ISBN 978-80-01-06453-5..
- [34] P. Steinbauer, P. Denk, J. Macek, J. Morkus a Z. Šika, „E-vehicle energy consumption optimization based on fleet and infrastructure information,“ v *JABLONSKI, R. J. a T. BREZINA, eds. Advanced Mechatronics Solutions* ISBN 978-3-319-23921-7, Cham, 2015.
- [35] P. Steinbauer, J. Macek, J. Morkus, P. Denk, Z. Šika a A. Barák, „Dynamic Optimization of the E-Vehicle Route Profile,“ *SAE Technical Paper 2016-01-0156*, 05 04 2016.