



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ

Bc. Jolana Heřmanová

**OPTIMALIZACE ŘÍZENÍ HEV S DŮRAZEM NA
METODIKU MĚŘENÍ SPOTŘEBY PALIVA WLTP**

Diplomová práce

2019



K616.....Ústav dopravních prostředků

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Jolana Heřmanová

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

N 3710 – IS – Inteligentní dopravní systémy

Název tématu (česky): **Optimalizace řízení HEV s důrazem na metodiku měření spotřeby paliva WLTP**

Název tématu (anglicky): HEV control optimization with respect to WLTP standard

Zásady pro vypracování

Při zpracování diplomové práce se řiďte osnovou uvedenou v následujících bodech:

- Popište typy elektro hybridních vozidel (HEV).
- Popište metodiku měření spotřeb osobních vozidel podle WLTP v kontextu HEV.
- Popište existující přístupy k řízení energetických toků v hybridních vozidlech.
- V simulačním SW GT Suite sestavte model HEV.
- Výsledky simulace porovnejte s měřením.
- Vyberte vhodnou metodu řízení a proveďte její optimalizaci za účelem nalezení strategie s minimální spotřebou paliva.
- Zhodnoťte výsledky.

Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího práce

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: Johannes, Liebl, et al.: Energiemanagement im Kraftfahrzeug. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014.
Qiuming Gong, et al.: Power Management of Plug-in Hybrid Electric Vehicles Using Neural Network Based Trip Modeling, 2009 American Control Conference, St. Louis, MO, USA, 2009.

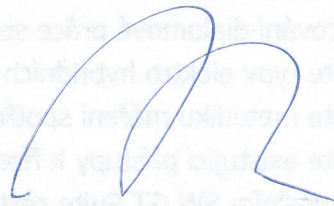
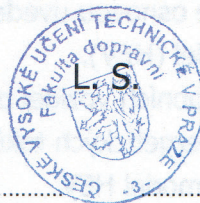
Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Petr Bouchner, Ph.D.**
Ing. Tomáš Heger

Datum zadání diplomové práce: **25. června 2018**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání diplomové práce: **28. května 2019**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia



doc. Ing. Petr Bouchner, Ph.D.
vedoucí
Ústavu dopravních prostředků



doc. Ing. Pavel Hrušeš, Ph.D.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.



Bc. Jolana Heřmanová
jméno a podpis studenta

V Praze dne 25. června 2018

Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala všem, kteří mě během mého studia a psaní diplomové práce podporovali. Zejména vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Petru Bouchnerovi, Ph.D. a doc. Ing. Stanislavu Novotnému, Ph.D. za odborné vedení a cenné rady. Dále společnosti ŠKODA AUTO a.s., která mi umožnila přístup k důležitým informacím, materiálům a vhodným simulačním nástrojům. Za konzultace a za rady, které mi poskytovali, bych chtěla poděkovat vedoucímu mé práce ze strany ŠKODA AUTO a.s. Ing. Tomáši Hegerovi a ostatním kolegům z oddělení EPO/5.

Dále bych chtěla poděkovat mé rodině a všem blízkým za veškerou podporu, kterou mi poskytovali.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou za závěr studia na ČVUT v Praze Fakultě dopravní.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

Jolana Heřmanová

V Praze dne

.....

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

OPTIMALIZACE ŘÍZENÍ HEV S DŮRAZEM NA METODIKU MĚŘENÍ SPOTŘEBY PALIVA
WLTP

Diplomová práce

květen 2019

Bc. Jolana Heřmanová

ABSTRAKT

Předmětem diplomové práce „Optimalizace řízení HEV s důrazem na metodiku měření spotřeby paliva WLTP“ je sestavit model dvou konceptů hybridních elektrických vozidel. Cílem práce je navrhnout strategii řízení HEV a optimalizovat ji za účelem nejnižší spotřeby v cyklu WLTP při zachování rovnovážné bilance stavu nabití baterie.

KLÍČOVÁ SLOVA

HEV, MHEV, simulace hybridního vozidla, WLTP, řídicí strategie HEV, optimalizace řídicí strategie

CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE

Faculty of Transportation Sciences

HEV CONTROL OPTIMIZATION WITH RESPECT TO WLTP STANDARD

Master thesis

May 2019

Bc. Jolana Heřmanová

ABSTRACT

The subject of the thesis "HEV control optimization with respect to WLTP standard" is to create a model of two concepts of hybrid electric vehicles. The aim of the thesis is to design a strategy of HEV control and to optimize it for the lowest consumption in the WLTP cycle while maintaining the balance of the battery state of charge.

KEYWORDS

HEV, MHEV, Hybrid vehicle simulation, WLTP, HEV control strategy, control strategy optimization

Obsah

Seznam použitých zkratk	7
Úvod	8
1 Hybridní elektrická vozidla (HEV)	10
1.1 Historie	10
1.2 Hybridní vozy podle legislativy	11
1.3 Základní charakteristiky komponentů	12
1.3.1 Spalovací motor	12
1.3.2 Elektromotor	13
1.3.3 Převodové ústrojí	14
1.3.4 Baterie	14
1.4 Hlavní oblasti úspor hybridních vozidel	15
1.5 Dělení hybridních vozidel	16
1.6 Dělení podle stupně hybridizace	16
1.7 Dělení podle uspořádání hybridního pohonu	17
1.7.1 Sériový hybrid	17
1.7.2 Paralelní hybrid	19
1.7.3 Sério-paralelní hybrid	21
1.7.4 Hybrid s rozdílným pohonem náprav	21
2 Metodika měření spotřeb hybridních vozidel podle WLTP	23
2.1 Měření spotřeb HEV	24
3 Přístupy k řízení HEV	26
3.1 Charge depleting (CD) režim	27
3.2 Charge sustaining režim	27
3.3 Volba režimu a rozdělování momentu v CS módu	28
3.3.1 Rule-based strategie – deterministická pravidla	28
3.3.2 Rule-based strategie – Fuzzy pravidla	29
3.3.3 ECMS (Equivalent consumption minimization strategy)	30
3.3.4 Dynamické programování	31

3.3.5	Další metody řízení	31
4	Model konvenčního a hybridního vozu	32
4.1	Software vhodný k simulacím hybridních vozidel	32
4.2	Modely konvenčních a hybridních vozů v GT Suite	33
4.2.1	Spalovací motor	34
4.2.2	Elektromotor	35
4.2.3	Baterie	36
4.2.4	Převodovka	36
4.2.5	Vozidlo	37
4.2.6	Řízení baterie	38
4.2.7	Řízení spalovacího motoru	39
4.2.8	Řízení brzd	39
4.2.9	Řidič	40
4.2.10	Řídící strategie HEV	41
4.3	Průběh simulace a porovnání výsledků pro konvenční vůz	41
4.4	Porovnání výsledků konvenčního vozu	43
5	Řízení a jeho optimalizace	45
5.1	MHEV – řídicí strategie (koncept 1)	46
5.1.1	Řídící strategie v modelu	47
5.1.2	Konstantní hodnoty a další vstupy pro optimalizaci	50
5.1.3	Průběh optimalizace	52
5.1.4	Výsledek optimalizace	54
5.2	MHEV+ – řídicí strategie (koncept 2)	56
5.2.1	Řídící strategie v modelu	56
5.2.2	Optimalizace řídicí strategie	57
5.2.3	Výsledek optimalizace	58
6	Porovnání simulace a měření prototypu MHEV+	60
7	Výsledky	65
7.1	Výsledky pro koncept 1	65

7.2	Shrnutí – koncept 1.....	67
7.3	Výsledky pro koncept 2.....	68
7.4	Shrnutí – koncept 2.....	70
8	Závěr.....	71
9	Zdroje.....	73
	Seznam obrázků.....	76
	Seznam tabulek.....	78
	Seznam příloh.....	79
	Příloha 1. – Výsledky optimalizace konceptu MHEV+	i

Seznam použitých zkratek

HEV	Hybrid electric vehicle	Hybridní elektrické vozidlo
ICEV	Internal combustion engine vehicle	Konvenční vozidlo
EV	Electric vehicle	Elektrické vozidlo
MHEV	Mild hybrid electric vehicle	HEV s nízkou mírou elektrifikace
PHEV	Plug-in hybrid electric vehicle z externího zdroje	HEV umožňující dobíjení
REEV	Range extender electric vehicle	EV s prodlouženým dojezdem
BEV	Battery electric vehicle	Bateriové elektrické vozidlo
WLTP	Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure	
ICE	Internal combustion engine	Spalovací motor
EM		Elektromotor
SOC	State of charge	Stav nabití akumulátoru
CD mód	Charge depleting	Mód s průměrně klesajícím SOC
CS mód	Charge sustaining	Mód s průměrně stejným SOC
RPM	Revolutions per minute	Otáčky za minutu

Úvod

Objem dopravy se celosvětově stále zvyšuje, což jako jednu z externalit způsobuje stále větší znečištění životního prostředí, zejména ovzduší. Ekonomické a politické faktory vytváří tlak na zvyšování efektivity a čistoty dopravy. Jednou z cest, jak toho dosáhnout, je využívání alternativních paliv, zvyšování účinnosti pohonů a převodů, nebo využití technologií pro čištění výfukových plynů předtím, než jsou vypuštěny do ovzduší. Druhou z cest je pak přenesení „špinavé“ části vozidel do jiných oblastí, tj. využívání elektrické energie přivedené z elektrárny daleko od města. V ideálním případě tato elektřina pochází z obnovitelných zdrojů, tj. z větrných, vodních nebo solárních elektráren. Vyrobena mohla být také v jaderných elektrárnách. Velká část elektřiny však stále pochází z uhelných elektráren. U elektrických vozidel se tedy znečištění jen přesouvá z místa užívání elektromobilu do místa, kde leží elektrárna.

Pohon na elektřinu je dnes nejvíce podporovaným alternativním pohonem. Pro splnění přísných limitů stanovených Evropskou komisí si výrobci nemohou příliš vybírat, jakou cestou se vydají. Elektrická energie je podle norem EU stále nejvíce zvýhodňovaným alternativním zdrojem energie pro pohon vozidel.

Největší výhodou elektřiny je možnost dobíjet při brzdění akumulátor z energie, kterou konvenční vozy (se spalovacím motorem) všechnu přemění na teplo. Vedle toho, že elektromobily nemají žádné lokální emise a nešpiní svým provozem okolní ovzduší (což má největší význam pro obydlené oblasti s hustým provozem), elektromotor dosahuje vyšších účinností při přeměně energie z akumulátoru směrem na kola, při provozu je méně hlučný a pohonný systém není tolik složitý.

S tím, jak se vylepšují technologie baterií a klesá jejich cena, začínají být elektromobily dostupnější. Elektromobily jsou však stále limitovány hlavně omezeným dojezdem, dobou nabíjení a chybějící infrastrukturou pro nabíjení.

Hybridní vozy dokáží spoustu nedostatků konvenčních vozů a nedostatků elektrických vozů odstranit nebo alespoň zmírnit. Existuje obrovská škála hybridních vozů, jejich uspořádání, míra elektrifikace, počty a druhy motorů a akumulátorů. Co všechny hybridy spojuje je velký dojezd srovnatelný s konvenčními vozy, nižší spotřeba paliva při zachování minimálně stejně dobrých dynamických vlastností, a často i jejich vylepšení. Elektrifikace dává více možností, jak dostat pracovní body spalovacího motoru do oblastí s vyšší účinností.

Zapojením druhé pohonné jednotky do systému však vzniká mnohem složitější systém kladoucí vysoké nároky na řízení celého systému a jednotlivých komponent. A v této oblasti je také nejvíce potenciálů na hledání úspor.

Mým cílem je v této práci navrhnout metodu řízení konceptu MHEV (Mild hybrid) a MHEV+ (hybridního vozu s elektricky poháněnou zadní nápravou). Na této metodě provedu optimalizaci pro dané konkrétní vozy a získám tak jejich maximální přínosy vůči konvenčnímu vozu.

První tři kapitoly se věnují úvodu do problematiky tématu. První kapitola obsahuje obecně popis hybridních elektrických vozů, využívané komponenty a jejich základní vlastnosti, definice HEV a způsoby jejich dělení podle různých hledisek. Druhá kapitola se věnuje tématu homologací a emisních testů podle nové metodiky WLTP a popisuje přístup evropské legislativy k hybridním a elektrickým vozům. Třetí z úvodních kapitol se zabývá běžně používanými přístupy k řízení energetických toků v hybridních vozidlech a některými optimalizačními metodami.

Prvním krokem ke splnění tohoto cíle bude postavit model vozu ve vybraném simulačním SW a výsledky simulace porovnat s výsledky ze standardizovaného SW interně používaného v koncernu Volkswagen. Tento krok slouží k ověření správnosti výpočtu základního modelu konvenčního vozu.

V druhém kroku rozšířím tento ověřený model o elektrické části a navrhnu a implementuji řízení hybridního vozidla. Toto řízení bude připraveno pro následující optimalizaci, přičemž hledání parametrů konstant pro tuto optimalizaci je nejdůležitější součástí práce. Pro řízení energetických toků vyberu jednu z metod popsanych ve třetí kapitole a vložím do ní hodnoty, na jejichž základě řídicí strategie rozhoduje o aktuálním módu hybridního pohonu a jakým způsobem mezi spalovací motor a elektromotor rozdělit požadovaný moment. Cílem optimalizace bude nalézt konstantní hodnoty takové, aby spotřeba v projetém cyklu WLTP byla co nejnižší. Abychom se vyhnuli dodatečným kompenzacím na počáteční SOC, musí strategie řízení splňovat podmínku, že stav nabití akumulátoru na konci cyklu bude stejný jako na začátku cyklu. Vůz s touto strategií řízení musí být schopný projet jakýkoli jiný jízdní cyklus.

Tímto způsobem získám pro konkrétní vůz optimální způsob projetí cyklu a budu ho moci porovnat s měřenými daty.

Navržený způsob řízení by měl být aplikovatelný ve vozidle.

1 Hybridní elektrická vozidla (HEV)

Hybridní elektrické vozidlo (Hybrid Electric Vehicle) je vozidlo, které kombinuje pohon se spalovacím motorem (ICE) a elektrickým motorem. Za tímto účelem má alespoň dva zásobníky energie (palivovou nádrž a baterii), alespoň dva různé motory (spalovací motor a jeden nebo více elektromotorů) a převodové ústrojí umožňující různé pracovní režimy obou motorů. Hlavní výhodou hybridních vozů je v tom, že umožňují provozovat spalovací motor v oblastech, kde má lepší účinnost. I malý elektromotor dokáže vozidlo pohánět v režimech nízkého zatížení, pomoci mu při prudkém zrychlování, v nízkých otáčkách... Vozidlo s elektromotorem může více využívat funkce Start-stop, pokud je vozidlo schopné čistě elektrické jízdy, nemusí se například pro pojiždění v kolonách vůbec nastartovat spalovací motor a uspoří tak palivo a zbytečné spaliny, zejména ve městech, kde jsou kongesce a časté zastavování běžné. Na druhou stranu oproti čistě elektrickým vozům mají dojezd stejný nebo srovnatelný s konvenčními vozy, tankování trvá několik minut a použití spotřebičů, jako klimatizace a topení nemá tak zásadní vliv na výsledný dojezd. Nevýhodou elektro hybridních vozů zůstává vyšší cena oproti konvenčním vozům, větší složitost celého systému, ať ze strany mechanických součástí, tak i ze strany správného řízení a vyšší hmotnost způsobená přidáním elektrických komponentů, převodových ústrojí a baterie.

1.1 Historie

Počátkům rozvoje automobilismu vládly elektrická vozidla. Do roku 1900 bylo v USA prodáno přibližně 4200 automobilů, z toho 40 % bylo elektrických. [1] Zbýlých 60 % byla vozidla se spalovacím motorem a jiná, například vozidla na parní pohon. [2]

Již v této době se začaly objevovat první hybridní vozy. Pravděpodobně první elektro hybridní vůz vyrobil Dr. Ferdinand Porsche v Německu v roce 1899 (Mixte Hybrid [3]). Další hybridní vůz byl vyroben v roce 1903 ve společnosti Krieger Company. Oba tyto hybridy se podobaly nejvíce dnešním sériovým hybridům. Po roce 1900 byly další vozy vyrobeny v Belgii a v USA. Ty se podobaly spíše paralelním hybridům. Elektromotor byl schopný spalovacímu motoru pomoci v případě nedostatku výkonu například ve stoupání, při prudší akceleraci, nebo k dosažení vyšší rychlosti. [1] Mechanické propojení spalovacího motoru s elektromotorem bylo nejčastěji přímé anebo řemenem. [2]

První hybridní vozy nebyly ekonomicky úspěšné. Nedosahovaly vysokých rychlostí a byly velmi složitě servisovatelné. Hlavními výhodami elektrických a hybridních vozů této doby oproti automobilům se spalovacím motorem bylo, že byly akusticky příjemnější, od pohonu bylo mnohem méně vibrací a přímo vozidlo přímo nevytvářelo žádné jedovaté plyny a jiné emise. Navíc u elektrických vozů nebylo nutné řadit a bylo jednodušší je nastartovat. [3]

Současně s automobily se hybridní pohony objevily také na železnici. Parní pohon začal být kombinován s elektrickým. [2]

Segment elektromobilů byl v té době velmi silný a až v první třetině dvacátého století byl převládán vozy se spalovacím motorem. Vymizení hybridních (HEV) a elektrických vozů (EV) napomohl pokrok ve vývoji konvenčních vozů, například využití elektrického startéru, zavedení sériové výroby H. Forda a jejich zlevnění. Mezi další důvody patří vysoká cena baterie, menší výkon, limitovaný dojezd, doba nabíjení a nedostatečná infrastruktura k nabíjení. [1]

V 70. letech 20. století a později se díky ropné krizi začaly znovu objevovat koncepty hybridních a elektrických vozů. Jedním z prvních byl Plug-in hybrid vyvinutý v Audi z roku 1989. Tento vůz měl elektricky poháněnou zadní osu elektrickým motorem o výkonu 9,4 kW a byl vybaven NiCd baterií. [1]

V USA byl vývoj elektrických a hybridních vozů podpořen i politicky. Například Kalifornie si dala za cíl v roce 2003 ze všech prodaných aut prodat 10 % bezemisních. Také kvůli obavám o ztrátu podílu na trhu se do vývoje EV a HEV pustily všechny velké americké automobilky. [1]

Zvláštní oblastí je v tomto ohledu Čína. Například v roce 2017 se v Číně prodalo 350 000 čistě elektrických vozidel (BEV – Battery electric vehicle) a nebo hybridů, které je možné dobít z externího zdroje (PHEV – Plug-in hybrid vehicle), což je skoro polovina z EV/PHEV, které se prodaly celosvětově. Je to ale způsobeno velkými dotacemi na tyto vozy (v některých případech až 90 % ceny). Tyto dotace by se do roku 2020 měly snížit na minimum. [1]

Historicky měly na vývoj EV a PHEV vždy vliv ceny paliv. S každou změnou v cenách paliv se totiž mění návratnost investice do těchto technologií. [1]

V posledních desetiletích procházejí hybridní vozy stále obrovským rozvojem. Do jejich vývoje se již zapojily skoro všechny velké automobilky, např. Toyota (Prius), Lexus, Kia, Hyundai, Renault, Volvo, BMW, Mercedes-Benz a další. [3]

1.2 Hybridní vozy podle legislativy

Definice hybridních pohonů lze nalézt velké množství. Následující příklady pochází z evropské legislativy.

Definice hybridního a hybridního elektrického vozidla lze nalézt v předpisu EHK 101:

„Hybridním hnacím ústrojím hnací ústrojí s nejméně dvěma různými měniči energie a dvěma různými systémy zásobníků energie (na vozidle) k pohonu vozidla.“

„Hybridním hnacím elektrickým ústrojím hnací ústrojí, které pro mechanický pohon odebírá energii z následujících dvou zdrojů uskladněné energie/výkonu umístěných na vozidle: použitelné palivo, zásobník elektrické energie/výkonu (např. baterie, kondenzátor, setrvačnickový generátor...)“ [4]

V nových normách, například těch upravujících homologaci vozidel podle WLTP pocházejících od UNECE je pak hybridní elektrický vůz definován jako vůz, který pro pohon používá alespoň jeden spalovací motor a alespoň jeden elektrický motor. [5]

1.3 Základní charakteristiky komponentů

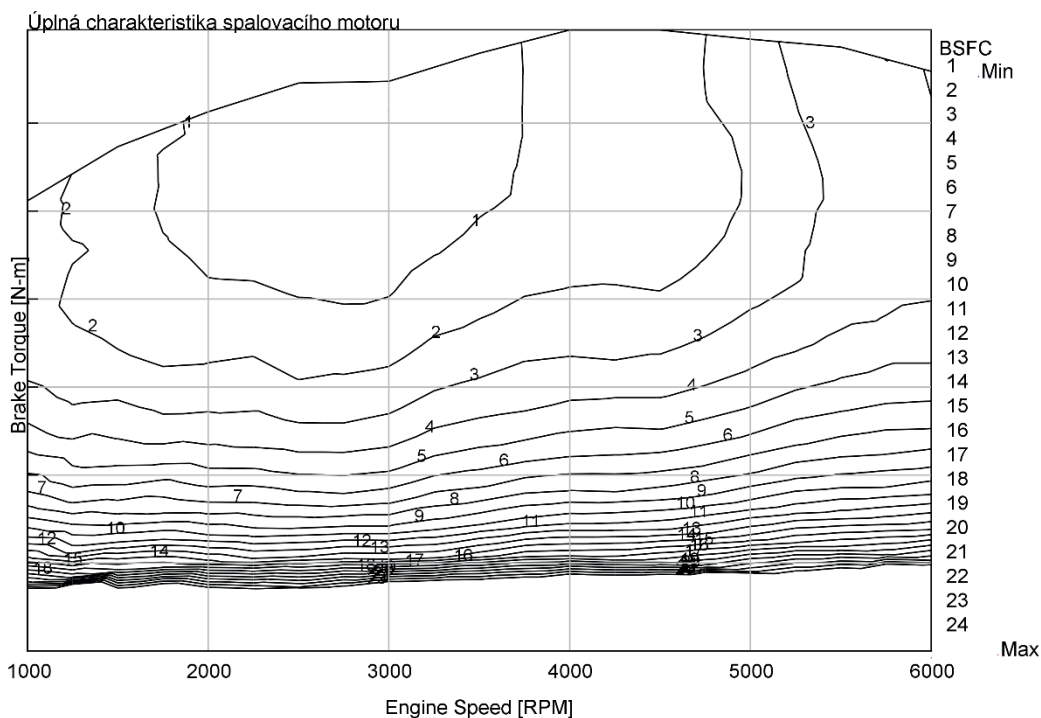
Hybridní vozy dokáží využít jak výhod elektrického pohonu, tak i pohonu se spalovacím motorem. Oproti konvenčním vozům (vozům se spalovacím motorem) mají tyto výhody: menší spotřebu paliva, méně škodlivých emisí, lepší podélnou jízdní dynamiku. Na druhou stranu dokáží také řešit nedostatky elektrických vozidel, mají větší dojezd, kratší dobu nabíjení baterie a také mají levnější baterii, protože si vystačí s menší kapacitou. [1]

Hlavním motivací vývoje hybridních vozů je především nižší spotřeba paliva. A toho hybridy dosahují zejména lepší prací s komponenty, se spalovacím motorem, elektromotorem, spojkami a převody. Základní charakteristiky těchto komponent jsou popsány níže.

1.3.1 Spalovací motor

Spalovací motor dokáže pracovat pouze v rozsahu otáček od volnoběžných (kolem 800 RPM – otáček za minutu) po své maximální otáčky (např. 6500 RPM). V tomto rozsahu je schopen poskytovat moment s maximem přibližně ve středu rozsahu otáček. Platí, že čím větší jsou otáčky a zatížení, tím vyšší je okamžitá spotřeba paliva v tomto bodě. Pro hodnocení účinnosti je ale lepší využívat měrnou spotřebu paliva přepočtenou na jednotku energie (g/kWh) a její zobrazení v závislosti na otáčkách a momentu motoru. V takové mapě je možné vidět, v jakých oblastech je spalovací motor nejúčinnější. Hybridizace vozu má za cíl dostat pracovní body motoru právě do těchto oblastí (Obrázek 1).

Úplná charakteristika spalovacího motoru



OBRÁZEK 1: SPALOVACÍ MOTOR – ÚPLNÁ CHARAKTERISTIKA^{1 2}

1.3.2 Elektromotor

Elektromotor má na rozdíl od spalovacího motoru rozsah otáček omezen pouze vrchním omezením. V nízkých otáčkách je schopný pracovat skoro od nulové hodnoty otáček. Maxima se také mohou pohybovat v jiných hodnotách. Elektromotory lze rozlišit na nízko-otáčkové a vysoko-otáčkové. Také průběh momentu je u elektromotorů jiný. Některé typy dokáží do určitého rozsahu od skoro nulových otáček poskytovat svůj maximální moment (jeho průběh je v této oblasti konstantní) a od těchto otáček výš již moment klesá, a naopak výkon je konstantní.

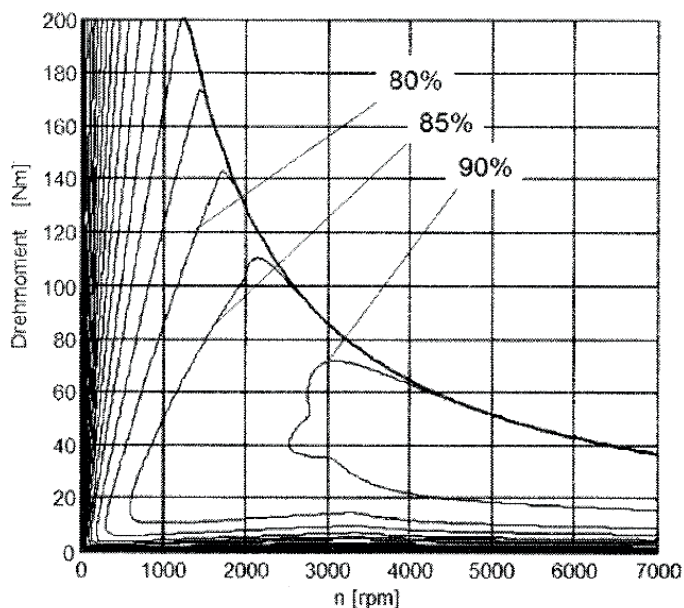
Elektromotory mívají i další omezení. Například maximální moment dokáží poskytovat jen po určitý časový interval, protože se postupně zahřívají. Teplota by neměla překročit určitý limit. Proto je v případě překročení maximální teploty omezen výkon, aby mohl motor vychladnout. Pro simulace se často používá přiblížení vyjádřené v sekundách (např. maximální moment smí být využíván pouze 10 sekund).

Účinnost elektromotorů lze vykreslit do grafu v závislost na otáčkách a zatížení elektromotorů (Obrázek 2). Oblast s nevyšší účinností je u elektromotoru mnohem větší než u spalovacího

¹ Osy grafu nejsou popsány z důvodu utajení

² Engine Speed [RPM] – otáčky motoru, Brake Torque – kroutící moment, BSFC – měrná spotřeba paliva

motoru. Elektromotor má většinou nízkou účinnost v oblastech velmi nízkých otáček a velmi nízkého zatížení.



OBRÁZEK 2: ELEKTROMOTOR – MAPA ÚČINNOSTI [6] ³

1.3.3 Převodové ústrojí

Ke ztrátám ve vozidle dochází i v převodovém ústrojí. Některé komponenty jsou na tom hůře a některé lépe. Část energie se ztrácí na spojkách třením, případně v hydromechanickém měniči.

Stejně tak i jednotlivé převodové stupně mají různé účinnosti převodu a lze pro ně sestavit mapy účinnosti. Je omezen také maximální moment, který převodovka dokáže přenést.

Převodovky jsou nejčastěji pěti- až sedmi-stupňové a mohou být manuální, automatické nebo robotizované. Také se často používají dvojspojkové převodovky, které dokáží řadit rychleji.

Nejvíce úspor se však dosáhne řízením řazení. Vozy s manuální převodovkou v jízdním cyklu musí řadit přesně podle předpisu. Všechny automatické převodovky řadí podle řadícího programu. To může být například soustava tabulek, podle kterých se například na základě rychlosti vozidla a polohy plynového pedálu určí aktuálně zařazený stupeň. Tyto tabulky mohou být vyjádřeny také v závislosti na otáčkách motoru.

1.3.4 Baterie

Mezi omezení baterií patří maximální výkon (proud), který je schopná poskytnout. Jeho velikost se mění s aktuální stavem nabití baterie. Další omezením je také provozní teplota

³ Drehmoment – kroutící moment

baterie. Pokud delší dobu poskytuje vyšší výkon, baterie se více ohřeje a pokud není dostatečně chlazená, dodávaný výkon se omezí.

Hybridní vozy mají oproti čistě elektrickým vozům velkou výhodu právě ve velikosti baterie. Pro hybridy typu MHEV nebo FHEV (Mild Hybrid, Full hybrid) stačí taková baterie, která dokáže poskytnout výkon pro několik rozjezdů. A to po několika zabrzdění dokáží zpět dobít. Proto požadovaná kapacita nemusí být vysoká. O tuto výhodu přicházejí ostatní typy hybridů jako je PHEV a REEV (Plug-in hybrid a Range extender hybrid). Ty jsou vybaveny baterií s vysokou kapacitou, aby dokázaly být primárně provozovány v čistě elektrickém režimu a teprve při poklesu stavu nabití baterie (SOC) se zapnul spalovací motor a poháněl a případně dobíjel baterii.

1.4 Hlavní oblasti úspor hybridních vozidel

Úspory na spotřebě paliva jsou hybridní vozy schopny dosáhnout několika způsoby. První velkou výhodou oproti konvenčním vozům je možnost dobíjení baterie během brzdění, tzv. rekuperační nebo regenerativní brzdění. Nejlepších výsledků dosáhne vůz, který během tohoto režimu může vypnout a odpojit spalovací motor a zároveň dokáže moment z kol přímo poslat do elektromotoru, aniž by se ztrátami prošel převodovým ústrojím.

Další významnou možností úspory paliva je čistě elektrická jízda. Tohoto režimu jsou schopna pouze vozidla, která mohou opět odpojit a vypnout spalovací motor a být poháněna pouze elektromotorem.

Pokud není vozidlo schopné čistě elektrické jízdy, může energii z baterie použít pouze k asistenci spalovacímu motoru při větším požadavku na výkon, a tím v těchto momentech snížit okamžitou spotřebu paliva.

Dalším prostorem pro zlepšení účinnosti celého systému je posunutí pracovního bodu (spalovacího motoru) do oblastí s lepší účinností (nejčastěji s vyšším zatížením). V tomto režimu také dochází k dobíjení baterie. Je však potřeba zvážit nakolik je výhodné spotřebovávat palivo a měnit ho na elektrickou energii uloženou v baterii. Většinou se využívá při nízkém stavu nabití baterie (SOC).

U elektrických vozidel je běžným problémem také způsob řízení elektrického motoru a všech elektrických částí, například výkonové elektroniky. Elektrické komponenty jsou během jízdy zatěžovány častými změnami režimů, při nichž dochází k velkým ztrátám. [3]

1.5 Dělení hybridních vozidel

Existuje mnoho různých způsobů dělení hybridních vozidel, každé podle jiných hledisek. Jsou to například:

- Dělení podle stupně hybridizace
 - (ICEV), Micro-HEV, MHEV, FHEV, PHEV, REEV, (BEV) případně FCEV nebo MHEV+
- Podle uspořádání hybridního pohonu
 - Paralelní hybrid
 - Sériový hybrid
 - Sério-paralelní hybrid
 - Hybrid s rozdílným pohonem náprav

Hybridizace se provádí ve vozidlech se spalovacím motorem na benzín, i na naftu. Zejména u dodávek, nákladních aut a autobusů má hybridizace velký potenciál. Existují také dieselové lokomotivy kombinující spalovací motor s generátorem a elektrickými trakčními motory například na více nápravách. Těmto systémům se říká „Simple hybrid“ a je to vlastně jen systém nahrazující běžná mechanická zařízení na přenos výkonu. Oproti klasickým hybridním vozům nepotřebují baterii. [1]

1.6 Dělení podle stupně hybridizace

Základním dělením hybridních vozů je dělení podle stupně hybridizace. Jedná se o míru, jakou se jednotlivé části pohonu podílejí na pohonu vozidla. Zároveň již tímto rozdělením je blíže určeno uspořádání komponent. [7]

Prvním vozem, který se nejvíce podobá konvenčním vozům je micro hybrid. Tento typ v některých okamžicích nesplňuje definici hybridního pohonu v bodě, že se obě složky mají aktivně podílet na pohonu. Často ani automobilkami není za hybrid označován. To, díky čemu je občas řazen mezi hybridní vozidla, je lepší řízení dobíjení 12 V baterie. Nabíjí především během brzdění, a naopak během akcelerace je dobíjení vypnuto. Během akcelerace se vypínají i některé spotřebiče, například klimatizace. [7]

Micro hybrid má většinou elektrický výkon do 10 kW, nedokáže pohánět čistě elektricky a elektromotor většinou pouze startuje a zastavuje spalovací motor a zajišťuje nabíjení baterie pro palubní síť. [1]

Dalším stupněm je Mild hybrid (MHEV). MHEV má také málo výkonný elektromotor, ale na rozdíl od micro hybridu již je schopen část momentu spalovacímu motoru poskytnout a podpořit ho při akceleracích a naopak během brzdění část energie přeměnit na elektrickou a dobít

baterii. Vozidlo má lepší dynamiku, je schopné uspořit palivo a případně zlepšit chování spalovacího motoru. MHEV má elektromotor s výkonem do 15 kW. Výhodou je jednoduchá zástavba do konvenčního vozu. Nevýhodou je nemožnost využít čistě elektrické jízdy. [7]

Hybrid, tak jak byl chápán původně je Full hybrid (FHEV). Tento typ má dva rovnocenné pohony, které umožní vozidlo pohánět i čistě elektricky, a naopak i čistě spalovacím motorem. Mezi těmito hraničními režimy je pak široká škála hybridních režimů, ve kterých je systém neúčinnější, a zároveň je nejsložitější jej správně řídit. Je možné využít skoro jakékoli uspořádání, což zvyšuje složitost systému, jeho hmotnost a cenu a náklady na vývoj. Na druhou stranu dává prostor pro optimalizaci systému a zmenšení spalovacího motoru. Čistě elektrický dojezd se běžně pohybuje od 1 do 10 km v závislosti na velikosti baterie. Někdy bývá omezen maximální rychlostí například na 30-50 km/h. [7]

Další formou hybridu je Plug-in hybrid (PHEV). Jde vlastně o FHEV, který je možno dobíjet z externího zdroje podobně jako čistý elektromobil. Kvůli tomu, také musí mít baterii s větší kapacitou. Čistě elektrický dojezd bývá až několik desítek kilometrů. Hlavní myšlenou za upřednostněním energie ze sítě je předpoklad, že elektrická energie přeměněná spalovacím motorem na palubě vozidla je „špinavější“ než ta, která byla vyrobená ve velkých elektrárnách. Započítává se také možnost původu energie z obnovitelných zdrojů a jaderných elektráren. Dalším aspektem pak může být pohled z globálního a lokálního hlediska. Strategie řízení PHEV by měla být odlišná od řízení FHEV. U PHEV je cílem využít na trase co nejvíce energie z baterie a spalovací motor zapínat co nejméně. Tento typ spojuje výhody elektrických vozidel ve městě a konvenčních vozů pro dlouhé cesty. Nevýhodami jsou stále vysoké ceny akumulátorů, vyšší hmotnost systému, životnost baterií a rozměry a složitost celého systému. [7] Výrazně nízkých spotřeb vozidlo ale nedosáhne, pokud není dobíjeno.

Posledním typem, který lze řadit mezi hybridy je Range extender hybrid (REEV). Jedná se vlastně již o čistě elektrické vozidlo (BEV/PEV – Battery/Pure electric vehicle) a liší se od něj tím, že má zabudovaný malý spalovací motor, který slouží pro prodloužení dojezdu. REEV je typickým zástupcem sériového hybridu.

1.7 Dělení podle uspořádání hybridního pohonu

Uspořádání hybridního pohonu má největší vliv na funkčnost a provozní vlastnosti celého pohonu. Dělení je uvedeno níže.

1.7.1 Sériový hybrid

Tyto vozy (Obrázek 3) vznikly původně z elektrických vozů za účelem rozšíření dojezdu (typickým příkladem je REEV). Jsou poháněny primárně elektromotorem (který pro takový

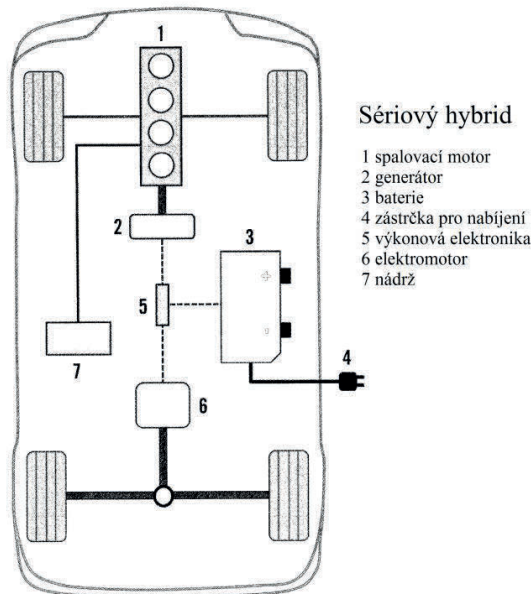
pohon musí být dimenzován) a vystačí mu spalovací motor s menším výkonem, který může po celou dobu jízdy pracovat ve stálém režimu. Mezi spalovacím motorem a koly vozidla není mechanické propojení. Ke spalovacímu motoru je připojen generátor, který může dobíjet baterii anebo posílat výkon směrem k trakčnímu motoru. Proto v tomto typu hybridu mohou být využity i jiné typy spalovacích motorů například spalovací turbína nebo Stirlingův motor. Spalovací motor díky mechanickému oddělení může být optimalizován pro provoz v dané užší oblasti. Baterie v těchto vozech dorovnává rozdíl mezi aktuálním požadavkem na výkon pro pohon a stálým výkonem spalovacího motoru. Baterii lze většinou dobít z externího zdroje. [8]

Elektromotor má pro přímý pohon vozidla velmi dobré výkonové charakteristiky. Maximální moment již od nulových otáček dokáže zajistit dynamický rozjezd vozidla, aniž by muselo docházet k prokluzu (jako dochází na spojce ve vozech se spalovacím motorem). Tvar křivky maximálního momentu má parametry velmi podobné optimálnímu pohonu vozidla. Proto velmi často není potřeba používat žádnou převodovku, nebo více než jeden převod. Koncept s jedním stálým převodem tak může být jednoduchý a levný. Pohonné ústrojí může být dále zjednodušeno odstraněním diferenciálu a nahrazením elektromotory pro jednotlivá poháněná kola, což je výhodné i pro řízení protiskluzových systémů pro jízdu v terénu, na sněhu, ledu nebo měkkém povrchu. [8]

Mezi nevýhody sériového hybridu patří opakovaná přeměna energie z mechanické na elektrickou a znovu z elektrické na mechanickou. Při každé této změně dochází ke ztrátám. Ve voze musí být minimálně dva elektromotory (což znamená hmotnost navíc), jeden generátor u spalovacího motoru a jeden trakční motor dost výkonný na to, aby zvládl pohon celého vozidla. [8]

Řízení takového vozu může být oproti jiným typům hybridních vozidel velmi jednoduché. Vůz je schopen provozu v těchto režimech:

- Čistě elektrická jízda
- Pohon spalovacím motorem (elektromotory slouží pouze jako převodové ústrojí, ale nepohání a nevybíjí baterii)
- Hybridní pohonný mód (o pohon se stará zároveň spalovací motor a zároveň část energie pro pohon pochází z baterie)
- Vůz je poháněn spalovacím motorem, ale zároveň se i během jízdy dobíjí baterie
- Rekuperační brzdění
- Nabíjení baterie spalovacím motorem během stání na místě [8]



OBRÁZEK 3: SÉRIOVÝ HYBRID [9]

1.7.2 Paralelní hybrid

Na rozdíl od sériového hybridu, kde mezi spalovacím motorem a elektromotorem existuje pouze elektrické propojení, v paralelní hybridu (Obrázek 4) jsou oba motory spojeny mechanicky. Mohou být propojeny dvěma způsoby, může být použit momentový dělič výkonu nebo otáčkový dělič výkonu. Pro první variantu jsou pro každou rychlost vozidla přesně dané otáčky motorů (mohou být upravené převody). Pro druhou jsou naopak pevně dané momenty a proměnné jsou otáčky. [8]

Spalovací motor i elektromotor mohou mít přímé propojení na kola. Propojení probíhá mechanicky v děliči výkonu. Mezi výhody patří menší počet přeměn energie, dochází proto k menším ztrátám. Na rozdíl od sériového hybridu, žádný z motorů nemusí být dimenzován na úplný pohon vozidla. Motory si mohou díky jednoduchému propojení jednoduše asistovat. V tomto konceptu také může být pouze jeden elektromotor. Nevýhodou je to, že spalovací motor nemůže být provozován v jednom stálém ideálním bodě, ale jeho rozsah otáček je závislý na rychlosti kol. [8]

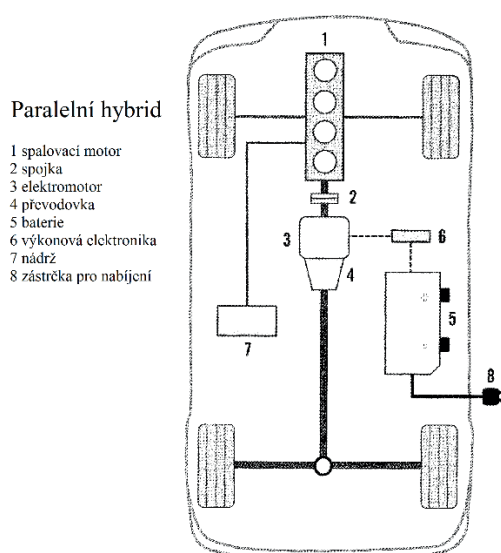
Paralelní hybrid může být provozován ve stejných provozních režimech jako sériový hybrid, ale řízení a strukturu má mnohem složitější. [8]

Nejčastějším způsobem zástavby v paralelním hybridu je zástavba elektromotoru přímo do převodovkové skříně nebo mezi spalovací motor a převodovku. Z hlediska účinnosti je výhodnější elektromotor zapojit až za převodovku. Moment elektromotoru nemusí projít převodovkou, kde by došlo ke ztrátám, ale na druhou stranu to klade vyšší nároky na elektromotor, protože jeho výstup na kola již není dále upravován. [7]

Momentový dělič výkonu je zařízení, které umožní sečtení momentů od obou motorů, zatímco jejich otáčky jsou pevně určené rychlostí kol a převodovými poměry. Dělič má dva vstupy a jeden výstup, z nichž výstup a jeden ze vstupů jsou obousměrné pro případ rekuperace během brzdění. Běžně se jako momentový dělič výkonu používá převodovka, spojení řemenem, řetězem, nebo hřídelí. Mezi motor a dělič výkonu lze vložit hřídel, převodovku, nebo jeden stálý převod. Čím více je možných kombinací převodových stupňů, tím náročnější je řízení a volba správného převodového stupně. Propojení může být realizováno také před vstupem do převodovky, nebo až za výstupem z převodovky. [8]

Další možností, jak výstup obou motorů propojit je použití otáčkového děliče výkonu. Na rozdíl od momentového děliče výkonu se zde sčítají otáčky obou motorů a poskytovaný moment je přesně určený. Typickým příkladem takového propojení je planetová převodovka nebo tzv. transmotor (elektromotor s využitím „floating“ statoru). Výhodou je, že otáčky motorů nejsou závislé na rychlosti kol, proto místo spalovacího motoru mohou být použity motory, které jsou náročnější na otáčky, v nichž jsou provozovány. [8]

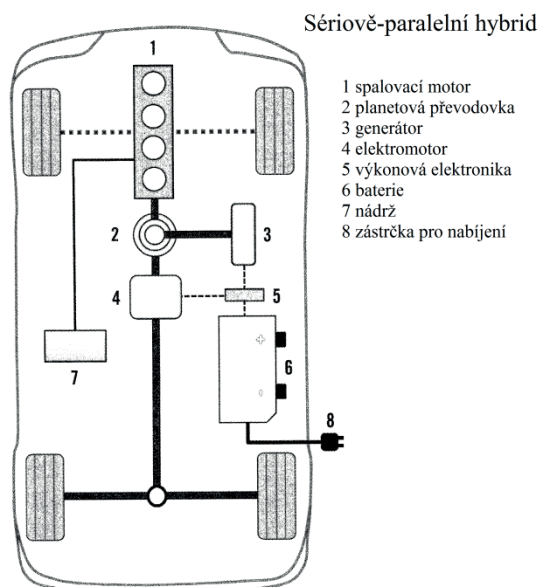
Zajímavé hybridní systémy vznikají při využití momentového i otáčkového děliče výkonu. Takové hybridní vozy dokáží pro každý režim využít rozdělení výkonu, které je pro daný okamžik nejúčinnější. Například pro akceleraci nebo jízdu ve stoupání je výhodnější momentové propojení. Naopak pro stálé režimy pak otáčkové. K takovému systému lze přidat třetí motor a provozovat systém v obou módech současně. Takové vozy se již řadí mezi sério-paralelní. Příkladem takového vozu je Toyota Prius.



OBRÁZEK 4: PARALELNÍ HYBRID [9]

1.7.3 Sério-paralelní hybrid

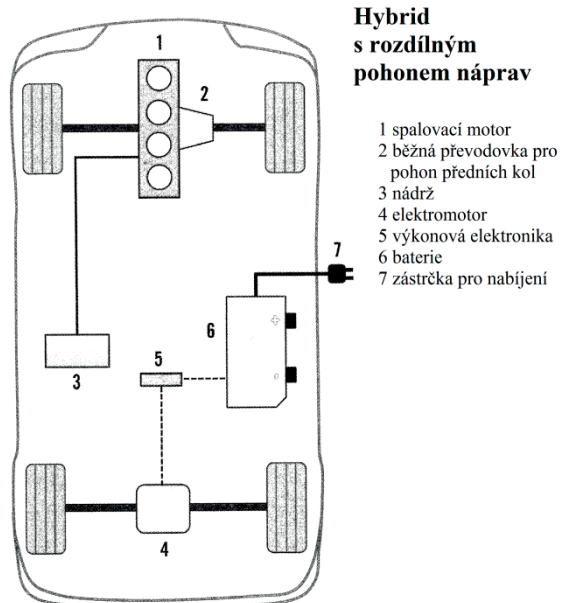
Jedná se o kombinaci obou předchozích typů hybridu, která těží z výhod obou uspořádání a potlačuje jejich nevýhody (Obrázek 5). Lze najít velké množství různých kombinací spalovacího motoru a jednoho či více elektromotorů a většího množství spojek, převodů, planetových soukolí a podobně. Tato zapojení jsou vůbec nejsložitější a často mnohem dražší. Kladou vysoké nároky na řízení, protože umožňují velký počet cest přeměn energie, s různými převody a může docházet k velkým ztrátám.



OBRÁZEK 5: SÉRIO-PARALELNÍ HYBRID [9]

1.7.4 Hybrid s rozdílným pohonem náprav

Pro tuto práci důležité zapojení (které bývá řazeno mezi paralelní hybridy) je hybrid s rozdílným pohonem náprav (Obrázek 6). Tento typ je poměrně jednoduché zastavět do konvenčního vozidla s pohonem všech čtyř kol, kde se na místo mezinápravového diferenciálu zabuduje elektromotor s další převodovkou nebo bez ní. Další jeho výhodou oproti jiným typům hybridů je pohon všech čtyř kol v případě potřeby. Vůz dokáže také jet i čistě elektricky. Nevýhodou je, že není možné dobíjet baterii, pokud vozidlo stojí na místě. Dobíjení za jízdy spalovacím motorem však teoreticky možné je. Druhou nevýhodou může být zmenšení zavazadlového prostoru z důvodu zástavby elektrického systému k zadní nápravě. [8]



OBRÁZEK 6: HYBRID S ROZDÍLNÝM POHONEM NÁPRAV [9]

V této práci porovnávaný koncept vozidla s poháněnou zadní osou kombinuje také elektromotor zapojený přímo ke spalovacímu motoru, které dává vozidlu ještě více provozních možností.

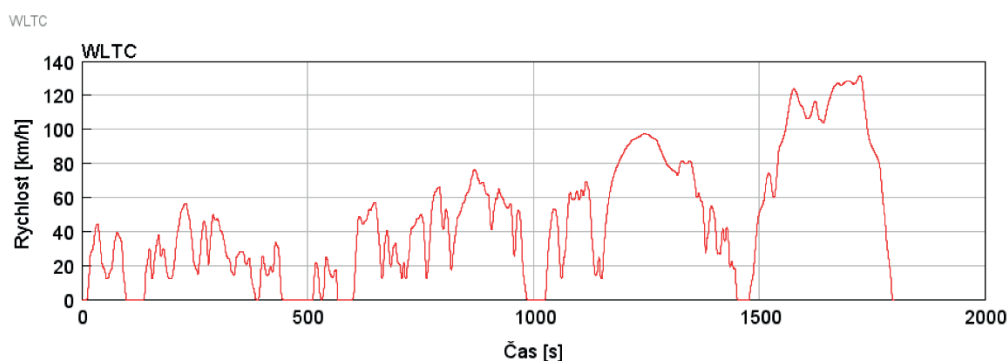
2 Metodika měření spotřeb hybridních vozidel podle WLTP

Od 1. září 2017 se všechny nové modely osobních aut homologují podle nové testovací procedury WLTP (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure), která nahradila proceduru z 90. let 20. století NEDC (New European Driving Cycle).

Nová procedura je od NEDC velmi odlišná a cílem jejího zavedení bylo především zpřísnění podmínek měření a přiblížení homologovaných spotřeb reálným spotřebám. Za touto normou stojí UNECE (United Nations Economic Commission for Europe) a její pracovní skupina zabývající se znečištěním a energetikou (Working Party on Pollution and Energy). Procedura WLTP byla schválena v roce 2014 a první měření podle ní byla prováděna od 1. září 2017. Procedura zavádí mnohem přísnější pravidla. Lépe odráží skutečné podmínky v provozu, zohledňuje použití klimatizace, vyhřívání sedadel a další spotřebiče. Stará testovací procedura měla velmi mnoho slabých míst, kterých výrobci využívaly. Výsledky z WLTP by měly být mnohem přesnější, více konzistentní a průběh testů opakovatelný. Mezi přínosy bude větší důvěra zákazníků v deklarované spotřeby a možnost autorit lépe stanovovat limity na uhlíkové emise. Podle jízdního cyklu homologační autorita testuje vozidlo v certifikované válcové zkušebně. Vozidlo zrychluje a zpomaluje přesně podle předepsaného jízdního profilu. Výstupy z takového měření je množství škodlivých látek ve výfukových plynech a také množství CO₂, tedy i spotřebovaného paliva. V testu se zohledňují také různé stupně výbavy. [10]

Součástí testu WLTP je mimo jiné i test RDE (Real Driving Emissions), ve kterém se měří především emise škodlivých látek a porovnávají se s povolenými limity během jízdy v provozu. Měření probíhá pomocí zařízení PEMS (Portable emissions measurement systém). [11]

Jízdní cyklus definovaný procedurou WLTP je označován jako WLTC (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle), viz Obrázek 7.



OBRÁZEK 7: PRŮBĚH RYCHLOSTI WLTC

WLTC se skládá ze čtyř částí. Jsou to: low, medium, high a extra-high. Maximální rychlost v cyklu je vyšší než 130 km/h. Rozlišuje se také několik tříd vozidel podle maximální

dosažitelné rychlosti. Většina osobních aut spadá do nejvyšší třídy – 3b (vozidla s maximální rychlostí nad 120 km/h). [5]

Každé vyrobené vozidlo patří do skupiny aut v CO₂ rodině, která mají podobné parametry a homologují se společně. Z každé této rodiny je vybrán reprezentant s nejvyšší hmotností a jízdními odpory označený jako „vehicle High“. Reprezentant s nejnižšími odpory a hmotností je označen jako „vehicle Low“. [5]

2.1 Měření spotřeb HEV

Také hybridní vozidla musí splňovat požadavky kladená na konvenční vozidla. Rozdíly v homologaci se týkají zejména elektrických částí, jejich bezpečnosti a funkčnosti, ale také měření spotřeb a emisí.

Norma používá tyto termíny: „Hybrid electric vehicle“ podle WLTP znamená vůz, který jako pohonné jednotky využívá alespoň jeden spalovací motor a alespoň jeden elektrický motor. Dále jsou hybridní vozy děleny na nabíjecí z externího zdroje a na ty, které není možné z externího zdroje dobíjet ("Off-vehicle charging hybrid electric vehicle" - OVC-HEV a „Not off-vehicle chargeable hybrid electric vehicle" - NOVC-HEV. Další kategorií jsou čistě elektrická vozidla (Pure electric vehicle PEV). [5]

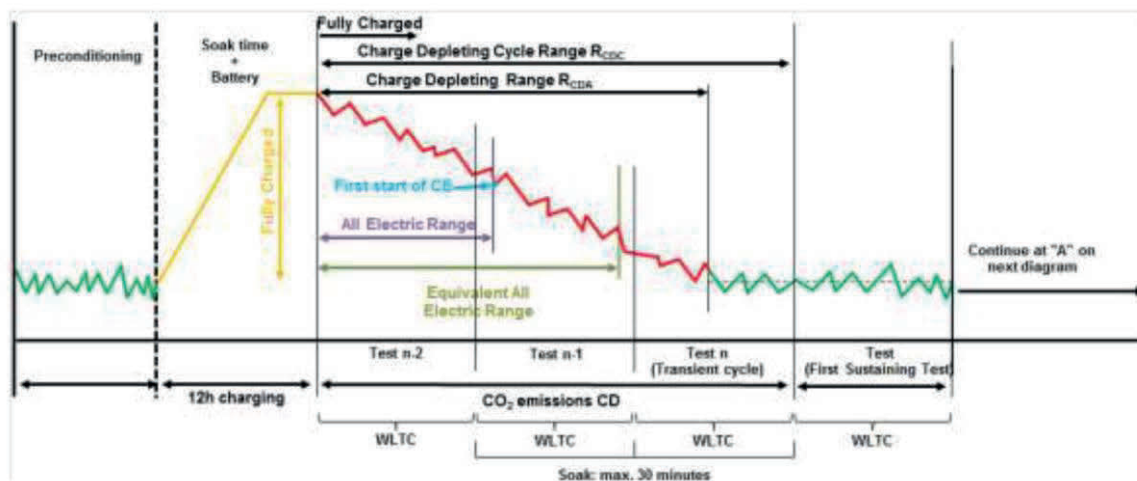
Norma u hybridních vozidel rozlišuje dva provozní módy: charge depleting a charge sustaining. Charge depleting je mód při němž uložená energie kolísá, ale v průměru má klesající tendenci až do okamžiku, kdy vozidlo přejde do charge sustaining módu, v němž také množství uložené energie kolísá, ale v průměru zůstává za jízdy na stejné úrovni. [5]

Čistě elektrický mód je definován jako pohon elektrickým motorem ze zásobníku energie (REESS – Rechargeable Electric Energy Storage System) bez žádného spotřebovaného paliva. [5]

Důležitým parametrem u elektrických vozidel je čistě elektrický dojezd. Norma jich definuje několik. První z nich – čistě elektrický dojezd (AER all electric range) je vzdálenost, kterou vozidlo, které je možné dobíjet z externího zdroje, schopno ujet počátku charge depleting módu až do bodu, kdy se musí zapnout spalovací motor. AER se měří pro WLTC cykly navázané přímo jeden za druhým. [5]

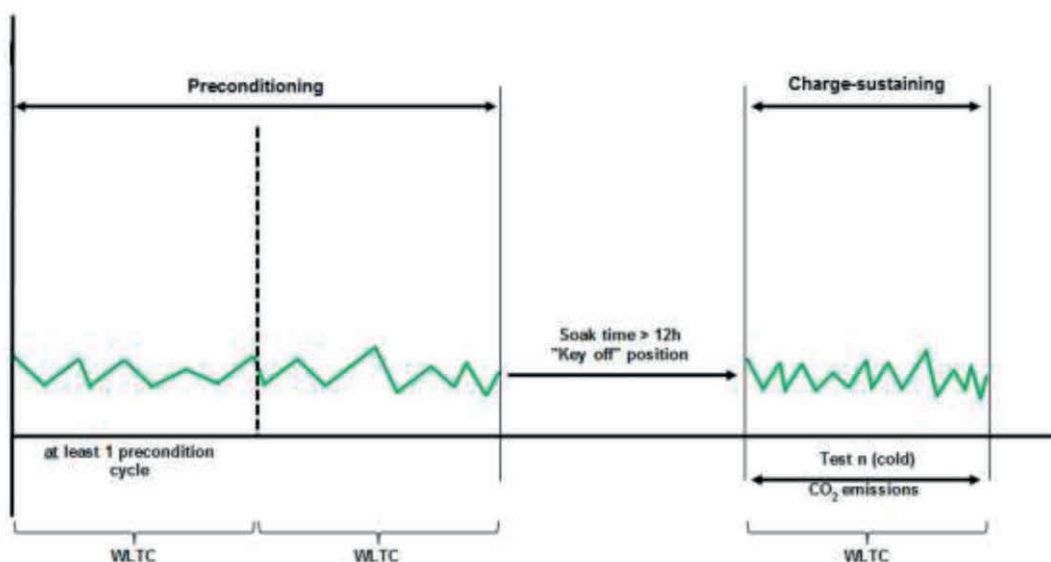
Jednou z variant průběhu testu pro vozidlo nabíjené z externího zdroje (OVC-HEV) je tento (Tabulka 8): test začíná jedním přípravným projetím cyklu, následuje několik hodin nabíjení a vychládání na danou teplotu (WLTP je měřeno při 23°C), dalším krokem je CD test (charge depleting), při němž se baterie vybijí na úroveň, kde začíná CS mód (charge sustaining). V tomto okamžiku je test přerušen a následuje vychládání. Po daném čase se test jede v CS

módu a test je zakončen nabíjením. Další varianty se liší pořadím jednotlivých testů nebo vynecháním jednoho z nich. Charge depleting mód je zde popsán jako mód, který je energeticky nejnáročnější (neuvažují se speciální módy určené jen pro zvláštní příležitosti jako mód do prudkého stoupání, nebo na údržbu). [5]



OBRÁZEK 8: PRŮBĚH TESTU PRO OVC-HEV [5]

Vozidla, která není možné dobít z externího zdroje (NOVC-HEV), jsou testována pouze v CS (charge sustaining) módu (Tabulka 9). Norma výrobci dovoluje určit si počáteční stav nabití, tak aby konečný stav nabití byl stejný. Výsledky jsou na závěr upraveny o případný rozdíl stavu nabití baterie (všech baterií v systému) vzniklý během cyklu. [5]



OBRÁZEK 9: PRŮBĚH TESTU PRO NOVC-HEV [5]

Dalším pravidlem pro hybridní nebo elektrické vozy je například to, že baterie v daném testovaném vozidle musí ujet již 300 km.

3 Přístupy k řízení HEV

Vůz se dvěma různými zásobníky energie a dvěma motory, pokud jeden z nich může být provozován obousměrně (elektromotor EM) a druhý jednosměrně (spalovací motor ICE) a pokud se abstrahuje od mechanického uspořádání jednotlivých komponentů, může být provozován obecně v těchto režimech:

TABULKA 1: REŽIMY PROVOZU HYBRIDNÍHO VOZIDLA [8]

	Režim	ICE	EM
1	Jízda se spalovacím motorem	on	off
2	Čistě elektrické jízda	off	on
3	Boost	on	on
4	Rekuperace	off	regen
5	Nabíjení za jízdy (bez výkonu na kola)	on	regen
6	Nabíjení během brzdění	on	regen
7	Nabíjení za jízdy (při dodání výkonu na kola)	on	regen
8	Nabíjení za jízdy a zároveň pohon elektromotorem	on	on
9	Jízda se spalovacím motorem, elektromotor brzdí a dobíjí	on	regen

Základními provozními režimy (Tabulka 1) hybridních vozů je čistě elektrická jízda a pohon pouze se spalovacím motorem. V těchto režimech se o pohon vozidla stará vždy pouze jeden z motorů a ten druhý je vypnutý. Třetím režimem je režim boost, nebo také asistence elektromotoru spalovacímu motoru, případně kombinovaný režim, při němž se na pohonu vozidla účastní oba dva motory. Čtvrtým režimem je režim rekuperace během brzdění vozidla. Spalovací motor je v tomto režimu vypnutý, ušetří se palivo a třecí ztráty. Následující režimy jsou režimy, během nichž elektromotor různými způsoby dobíjí baterii. Prvním z nich je nabíjení během plachtění, s motorem běžícím na volnoběh. Druhým z nich je aktivní dobíjení spalovacím motorem a zároveň nabíjení během brzdění. Následuje nabíjení baterie během pohonu spalovacím motorem. Čtvrtým z těchto nabíjecích režimů je případ sériového hybridu, kdy spalovací motor generátorem dobíjí, zatímco trakční motor pohání vozidlo. Poslední režim může být použit ve vozidle s odděleně elektricky poháněnou zadní osou, kdy spalovací motor pohání vozidlo, a elektricky poháněná zadní náprava brzdí a nabíjí přitom baterii. [8]

Úkolem řízení energetických toků ve vozidle je vybrat pro každou situaci optimální provozní režim, přičemž tato úloha je jiná pro každý hybrid podle mechanického uspořádání a podle míry hybridizace.

Ideální řídicí strategie je taková, která splňuje tyto tři kritéria [12] :

- Minimalizuje spotřebu paliva
- Klade nízké nároky na výpočetní výkon HW

- Lze ho jednoduše implementovat do vozidla

3.1 Charge depleting (CD) režim

Na charge depleting a charge sustaining mód se dělí řízení vozů, které mají velkou kapacitu baterie, dokáží ujet čistě elektricky až několik desítek kilometrů a během jízdy je jejich cílem co největší část cesty jet co nejčistěji, šetřit palivo a vypustit do okolí co nejméně škodlivých emisí. Typickým vozem pro tento režim je PHEV (Plug-in hybrid). Ideální provozní režim takového vozu je nabíjet ho přes noc, jet do práce a z práce co nejčistěji, přes noc znovu nabíjet a spalovací motor používat nejlépe jen v případě nouze „na dojezd“ anebo ho využít pro delší trasy. Realita bohužel je často taková, že vůz během provozu není dobíjen a většinou jezdí pouze v charge sustaining módu. V CS módu PHEV bohužel již není tak účinný zejména kvůli velké baterii, která tvoří zbytečnou zátěž navíc. Pro pohon v CS módu stačí mnohem menší kapacita baterie.

Pro řízení v CD módu je velmi výhodné znát předem průběh trasy, nebo alespoň její odhad. Řízení PHEV lze pojmut dvěma způsoby. Běžný je provoz právě v CD módu a následně v CS módu. Pokud je však známá trasa, což pro většinu cest, které uživatel podniká, platí pak je možné vozidlo řídit výhodněji v tzv. „Blended discharge“ režimu [13]. S využitím systému GIS je lze na základě mapových podkladů a sad měření běžných rychlostních profilů jízd, lze velmi dobře pro danou trasu odhadnout rychlostní profil dané trasy. A na základě toho, již může řídicí algoritmus odhadnout, jak nejlépe s energií uloženou v baterii pracovat. K tomu je možné využít například pro tyto účely upravené dynamické programování (two scale dynamic programming algorithm), které řeší problém s malým výpočetním výkonem elektroniky ve vozidle, viz [14].

3.2 Charge sustaining režim

Pod CS módy patří ostatní hybridní vozy – MHEV a FHEV, které nejsou schopny tak velkého čistě elektrického dojezdu. Tyto hybridy se snaží během jízdy jet co nejefektivněji a po celou jízdu využívají celou kapacitu baterie. Nepotřebují mít tak velkou kapacitu a tím šetří hmotnost.

Pro CS mód platí, že konečné SOC (state of charge – stav nabití baterie) by mělo být přibližně stejné jako SOC na začátku jízdy. Tyto vozy není možné dobít z externího zdroje, mohou použít pouze energii přeměněnou během brzdění nebo energii dobitou spalovacím motorem z paliva.

Během návrhu systému, který by měl oba pohony co nejvíce využívat v optimálních oblastech lze vyjít z předpokladů. ICE je účinný ve středním rozsahu otáček a vyšším zatížení a jeho účinnost se velmi liší pro různé oblasti mapy. Elektromotoru má oblast s nejlepší účinností

větší a pokles účinnosti s otáčkami a zatížením není tak velký. Jeden z možných přístupů je si jízdní profil, vyjádřený požadavkem na výkon rozdělit na statickou a dynamickou část, spalovací motor dimenzovat pouze na statickou část (může být menší) a elektromotor na ten zbytek. Dynamická část by v tomto případě měla být v součtu za celý cyklus nula. [8]

3.3 Volba režimu a rozdělování momentu v CS módu

Volba konkrétního módu v daný okamžik probíhá na základě aktuálního požadavku, který může být vyjádřen okamžitým výkonem, požadavkem na moment, nebo aktuální polohou plynového pedálu, jako v běžném vozidle.

Pro záporný požadovaný moment je nejvýhodnější vždy co nejvíce energie dobít do baterie a optimalizovat řízení má smysl v případě, že by docházelo k provozu v nevýhodných režimech (například příliš nízký moment nebo otáčky elektromotoru, v řádu několika jednotek Nm/RPM).

Největší nároky jsou ale kladeny na to, aby systém dokázal správně vyhodnotit, zda se v daný okamžik vyplatí:

- pohánět vůz čistě elektricky a přijít o %SOC v baterii nebo
- zatížit spalovací motor, nabíjet baterii a tím posunout pracovní bod do oblasti s lepší účinností nebo
- pohánět vůz pouze spalovacím motorem nebo
- snížit zatížení spalovacího motoru, doplnit ho elektromotorem a mírně tak snížit SOC, tj. boostovat.

Tuto otázku řeší například tyto způsoby řízení:

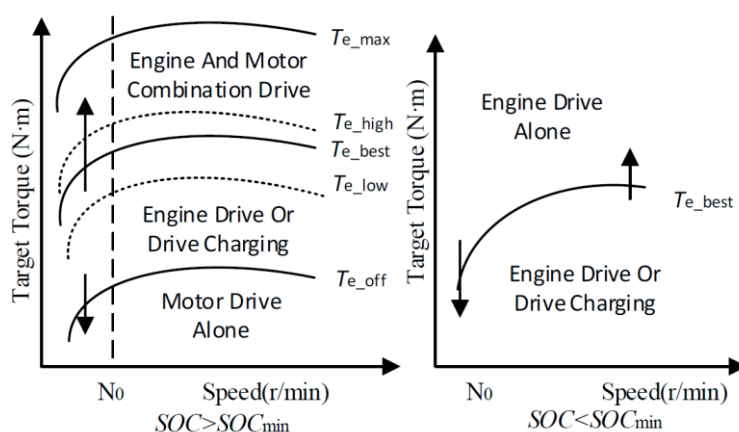
- Řízení na základě sady pravidel – rule based
 - o Deterministická pravidla
 - o Fuzzy pravidla
- ECMS (Equivalent consumption minimization strategy)
- Dynamické programování

3.3.1 Rule-based strategie – deterministická pravidla

Řízení na základě deterministických pravidel je nejjednodušším a nejlépe aplikovatelným řízením. Dnes je ve vozidlech vůbec nejběžnějším řízením.

Rozhodování o rozdělení výkonu a provozním módu probíhá na základě rychlosti nebo požadavku na výkon.

Druhým přístupem je rozhodování na základě křivky optimálního zatížení spalovacího motoru, která je určena účinností spalovacího motoru, elektromotoru a baterie v daných režimech. Hranice mohou být určené například tak, jako jsou na obrázku (Obrázek 10). Pro vysoké SOC je možné zvolit tyto režimy směrem od nízkého požadovaného zatížení: čistě elektrická jízda (Motor Drive Alone), nabíjení spalovacím motorem za jízdy (Engine Drive Or Drive Charging) nebo kombinace obou pohonů (Engine And Motor Combination Drive). Naopak pro nízké SOC jsou k dispozici pouze dva režimy a to: pohon spalovacím motorem a nabíjení (Engine Drive Or Drive Charging) nebo pohon pouze spalovacím motorem (Engine Drive Alone). [15]



OBRAZEK 10: SCHÉMA LOGICKÝCH HRANIC PRO JEDNOTLIVÉ REŽIMY [15]

Nejnáročnějším úkolem je určit dané hranice. Lze použít kombinaci více kritérií a to nejlépe: optimální provozní oblast spalovacího motoru, optimální provozní oblast baterie (rozsah SOC) a rychlostní limity. [15]

Při řízení se postupuje od znalosti požadavku na moment, přes rozhodnutí o vhodném provozním režimu, k vyčíslení výstupních momentů pro jednotlivé motory. [15]

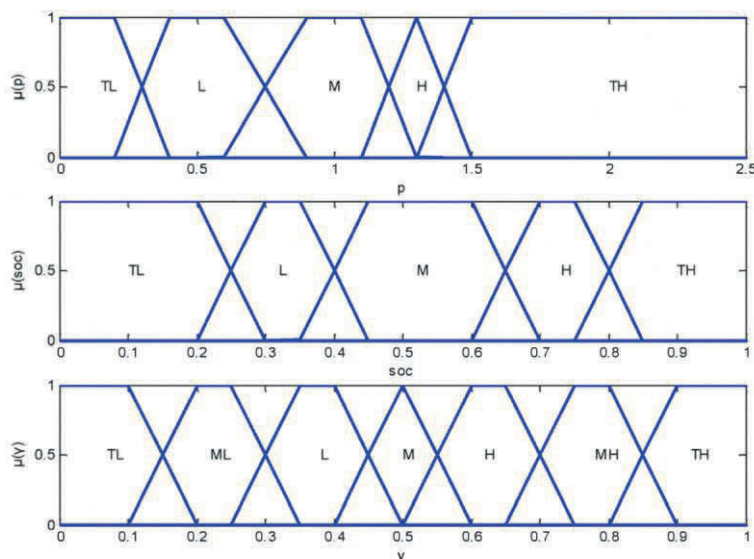
Hlavní výhodou této metody je, že struktura programu je jednoduchá, obsahuje pouze několik pravidel, algoritmus pracuje velmi rychle, je jednoduchá jeho implementace do vozidla a jednoduché a intuitivní zacházení s pravidly. Na druhou stranu mezi nevýhody lze zařadit náročnější tvorba škály pro hranice mezi jednotlivými režimy. Příliš jednoduché řízení nebude optimální a příliš podrobné řízení může trpět vibracemi a chybami. [16]

Toto řízení lze optimalizovat jen pro specifický jízdní cyklus.

3.3.2 Rule-based strategie – Fuzzy pravidla

Řízení na základě fuzzy logiky je velmi podobné běžnému předchozímu typu řízení. Liší se trochu postup, rozdělení škál, jemnost výsledku... Fuzzy logika také pracuje na základě sady pravidel. Rozdílné je zpracování vstupů (požadovaný moment, stav SOC). Vstupy jsou rozděleny do překrývajících se intervalů (Obrázek 11). Na obrázku jsou v prvních dvou řádcích

zobrazeny vstupy – požadavek na výkon a SOC a ve spodním řádku je uveden odpovídající výstup.



OBRÁZEK 11: PŘÍKLAD VSTUPY A VÝSTUP – FUZZY LOGIC [16]

Výhodou tohoto postupu je menší počet přechodů mezi jednotlivými provozními režimy a také větší podobnost tomu, jak by o problému uvažoval člověk.

3.3.3 ECMS (Equivalent consumption minimization strategy)

Další oblíbenou metodou řízení je ECMS. Patří mezi statické optimalizační metody a je založena na metodě PMP (Pontryagin's Minimum Principle). Na začátku se definuje cílová funkce, podmínky a omezení pro řízení a přípustné oblasti řízení. [12]

Metoda začíná ohodnocením každé možné kombinace. V průběhu simulace pak pro každý časový okamžik vybírá tu nejvýhodnější variantu. Algoritmus se rozhoduje na základě „cost function“, kterou se snaží minimalizovat. Tato funkce se skládá z části spotřebovaného paliva v daný okamžik a „ceny“ využití energie z baterie (ekvivalentní spotřebě paliva). Tu je možno konstantou penalizovat. Výsledkem může být „levnější“ energie z baterie pro oblast vysokého SOC a naopak „dražší“ energie pro nízké SOC. Výstupem tohoto algoritmu je teoretický maximální potenciál technologie, který je však těžko aplikovatelný ve vozidle. Oproti rule-based metodám dosahuje lepších výsledků, ale s mnohem delším časem na výpočet. [17]

Nevýhodou je, že negarantuje nalezení globálního optima a vyžaduje naladění faktorů ekvivalence pro spotřebu elektrické energie. [12]

Existují také varianty ECMS pracující na základě minulých a aktuálních dat, ale také prediktivní ECMS (A-ECMS) pracující s odhadem pro budoucí jízdní podmínky. [13]

3.3.4 Dynamické programování

Dynamické programování je metodou, která se snaží nalézt globální optimum, pracuje iteračně a je výpočetně velmi náročná. [12]

Většinou pracuje tak, že postupuje směrem zpět na určitém časovém horizontu, na kterém se snaží minimalizovat danou „cost function“.

Mezi výhody patří nalezení globálního optima pro širokou škálu provozních režimů-

Nevýhodou je výpočetní náročnost a nemožnost využití v reálném čase, pokud není dopředu znám profil trasy. [14] Proto není vhodný k implementaci v řízení ve vozidle. [13]

Tuto metodu je výhodné kombinovat s jinými metodami, které jsou schopny předem odhadnout rychlostní profil trasy (například spoluprací s vozidlovou navigací, systémy GIS a dopravními modely). Pak lze zjednodušenou metodu dynamického programování aplikovat úspěšně ve vozidle. [14]

3.3.5 Další metody řízení

Dalšími navrhovanými metodami mohou být algoritmy založené na výše zmíněných. Jsou to například:

- PEARS (Power-weighted Efficiency Analysis for Rapid Sizing) [12]
 - o Pohybuje se blízko optimálního řešení. Pracuje s váhami účinnosti jednotlivých režimů a dokud není splněna podmínka CS módu, iterativně nahrazuje nejúčinnější mód méně účinným, až do nalezení finálního řešení.
- SERCA (Slope-weighted Energy based Rapid Control Analysis) [12]
 - o Pracuje na základě derivací prvního řádu a rovnováhy energie. Snaží se najít optimální řízení s vyrovnaným přínosem v úspoře paliva, ale zároveň v úspoře výpočetního času.
- Model predictive control [13]
 - o Pracuje s odhady budoucího vývoje. Nalezená řešení mohou být blízko optima
- Inteligentní strategie založené na neuronových sítích [16]
- Pokusy také s GA (genetické algoritmy), MA (Memetic algorithms) a PSO (Particle Swarm Optimization) [18]

4 Model konvenčního a hybridního vozu

V praktické části této práce je popsána stavba modelu v simulačním SW. Prvním modelem je model konvenčního vozu, na něj navazuje model hybridního vozu MHEV a druhého konceptu hybridního vozu MHEV+. V další části je navržen nový způsob řízení obou vozů, popsán způsob jeho implementace do modelů a byla provedena jeho optimalizace. Na závěr jsou uvedeny přínosy hybridních vozů oproti konvenčnímu vozu.

V prvním kroku byl sestaven model konvenčního vozu ve vhodném simulačním programu a výsledek simulace byl porovnán s výsledkem ze standardizovaného SW.

V další části byl model rozšířen o elektrické části a na vzniklém modelu hybridního vozu aplikován navržený postup řízení rozdělení momentu mezi jednotlivé motory.

Pro tuto práci byly zvoleny dva koncepty hybridního vozu oba se 48V systémem. Prvním konceptem je MHEV s elektromotorem zapojeným za spalovacím motorem se stálým převodem. Elektromotor je ke spalovacímu motoru připojen řemenem. Druhým konceptem MHEV+ je vůz se samostatně poháněnou zádní osou. Spalovací motor s malým elektromotorem (RSG) zůstává stejný. Oba modely představují reálná vozidla postavená ve Škoda Auto a.s. jako prototypy. Pro oba vozy se pracuje na implementaci vhodného řízení.

K dispozici jsou všechna data o vozidle potřebná pro provedení simulace, také spotřeby v jízdním cyklu WLTP konvenčního vozu vypočtené ve standardizovaném SW vyvinutém pro koncern VW. Těmto hodnotám by se základní model konvenčního vozu měl přiblížit.

K hybridnímu vozu jsou k dispozici data o komponentech a data z projetého jízdního cyklu WLTP změřená na válcové zkušebně s neoptimalizovaným řídicím algoritmem. Tato data jsou porovnána v kapitole 6.

V následujících podkapitolách je popsán vybraný SW a stavba modelu vozu.

4.1 Software vhodný k simulacím hybridních vozidel

Pro modelování vozidel a související výpočty lze použít velké množství SW. Lze použít obecný SW, který není zaměřen na konkrétní problémy jako je Microsoft Excel, nebo MATLAB/Simulink. Další kategorií SW jsou SW přímo určené k simulacím vozidel a souvisejících systémů (spalovacích motorů, převodovek...). Mezi ně patří například GT Suite, Ricardo IGNITE, Simcenter Amesim, AVL Cruise a mnoho dalších. Pro složitější úlohy je velmi častá simulace v několika SW zároveň. Například řízení bývá často realizována v jiném SW, než ve kterém je fyzikální model vozidla. Využívá se také oddělený optimalizační SW.

Metody řízení a optimalizační metody aplikované ve vozidlech a běžně využívané při vývoji vozidel jsou popsány v kapitole 3.

Pro tuto práci byl vybrán simulační software GT Suite, který je určený k výpočtům a simulacím z různých oblastí fyziky. Obsahuje rozsáhlou knihovnu komponent pro výpočty proudění, akustiky, přenosů tepla, mechanické, elektrické ale i chemické energie. Další komponenty jsou z oblasti řízení a zpracování signálů. Dokáže pracovat s modely na úrovni konceptu, ale i s velmi propracovanými systémy. Z mechanických, případně elektrických komponent lze sestavit model celého vozidla a z knihovny řídicích komponent sestavit jeho řízení. Velké množství komponent a možnost jejich nahrazení komponentami na jiné rozlišovací úrovni dávají uživateli velké množství možností. Do SW je implementováno několik základních optimalizačních metod, mezi kterými je možno zvolit tu nejvhodnější pro dané účely. [19]

4.2 Modely konvenčních a hybridních vozů v GT Suite

Pro modely celých vozů obsahuje GT Suite zvláštní knihovnu prvků jako jsou kola, karoserie, spalovací motor, převodovka a podobně. Pro část řízení lze použít knihovnu řídicích, logických, nebo matematických prvků. Níže jsou popsány všechny části modelu.

Hybridní vůz z velké části vychází z konvenčního vozu, proto lze práci začít právě stavbou modelu konvenčního vozu. Koncept 1 a koncept 2 hybridního vozu se liší jen na několika místech modelu. Nejvíce přepracovaná je část řízení. Zatímco v konvenčním voze stačí posílat všechen požadovaný moment spalovacímu motoru, v modelu hybridního vozu musí být nějaký systém na rozdělení požadovaného momentu na jednotlivé motory. V prvním konceptu je jen jeden elektromotor, v druhém konceptu jsou elektromotory dva a úloha tak získává na složitosti. Pro druhý koncept se odlišuje také model vozu (MHEV+ má poháněnou zadní osu) a část převodovky (je vybavena řízením spojky pro možnost čistě elektrické jízdy). Pro konvenční vůz v modelu zůstává elektromotor ve formě startéru i s baterií. Bez těchto dvou komponent by vůz nebyl schopný využívat systém Start-stop. Od konceptu 1 (MHEV) se liší pouze ve výstupech řídicí strategie. Struktura modelu je pro všechny tři vozy stejná.

Model vozu v GT Suite se skládá z mnoha menších stavebních bloků, často jsou to již předpřipravené bloky, ale GT Suite umožňuje si i takové bloky postavit vlastními silami z menších bloků. Tyto bloky jsou spolu propojeny mechanickými vazbami, elektrickými vazbami, nebo signály. Vazby mohou být vedeny přímo označenou šipkou z bloku do bloku, další možností je využití „bezdrátového“ signálu anebo zvláštních bloků pro přijetí a odeslání signálu. V modelu jsou tyto tři způsoby kombinovány. Uvnitř jednotlivých celků modelu je preferováno vyjádření signálu šipkou. Pokud jde o signály přenášené mezi celky, většinou je

použit blok na přijetí „bezdrátového signálu“ a poté je signál zpracováván v dalších blocích. V části řídicí strategie jsou signály načteny bezdrátově v jednotlivých blocích.

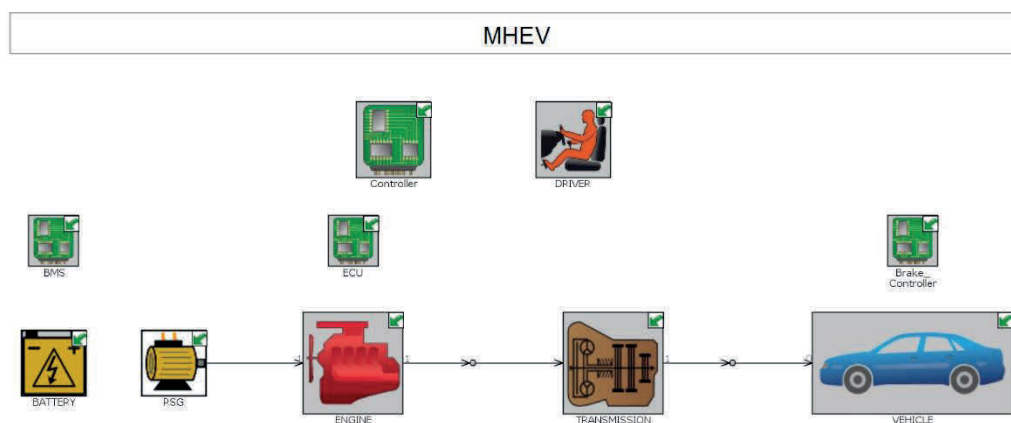
Model vozu v GT Suite se skládá z těchto mechanických celků:

- Spalovací motor (ENGINE)
- Elektromotor (RSG)
- Baterie (BATTERY)
- Převodovka (TRANSMISSION)
- Vozidlo (VEHICLE)

A z těchto řídicích celků:

- Řízení baterie (BMS)
- Řízení spalovacího motoru (ECU)
- Řízení brzd (Brake Controller)
- Řidiče (DRIVER)
- A řídicí strategie (Controller)

Níže je zobrazen přehled celého modelu (viz Obrázek 12).

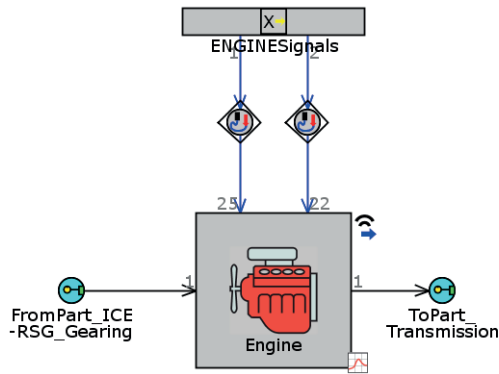


OBRÁZEK 12: MODEL MHEV V GT SUITE

4.2.1 Spalovací motor

Nejdůležitější součástí modelu je blok spalovacího motoru. Tento blok je vyplněn daty o motoru, tj. vnější křivkou motoru, jeho úplnou charakteristikou a mapou třecích ztrát. Dále je nutné do modelu vložit údaj o objemu motoru, počáteční a minimální otáčky a způsob jeho řízení (moment, výkon, akcelerační pedál).

Blok motoru (Obrázek 13) je spojen mechanicky (černé čáry) s blokem elektromotoru a s blokem převodovky. Je řízen dvěma řídicími signály (modré čáry), a to údajem o aktuálním požadovaném momentu a údajem o stavu zapnutí motoru (on/off).



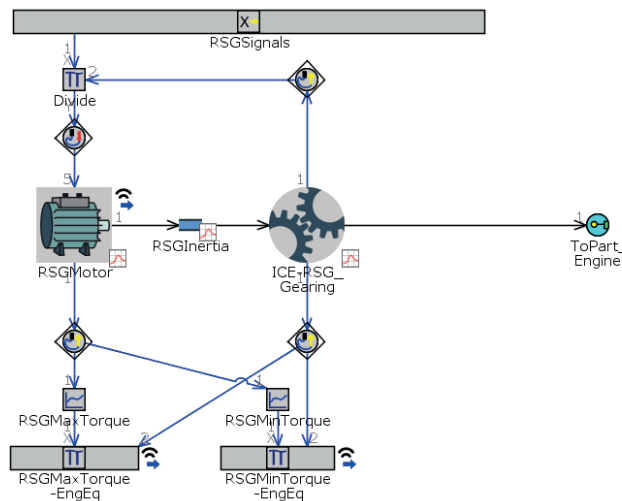
OBRÁZEK 13: SPALOVACÍ MOTOR

4.2.2 Elektromotor

Na spalovací motor navazuje blok elektromotoru (Obrázek 14), který je připojen přes jednoduchý převod. V reálném voze je připojen řemenem. U tohoto propojení je nutné nastavit převodový poměr a účinnost převodu.

Elektromotor podobně jako spalovací motor musí být vyplněn výkonovými charakteristikami, a to křivkou maximálního a minimálního momentu v celém rozsahu otáček a mapou účinností.

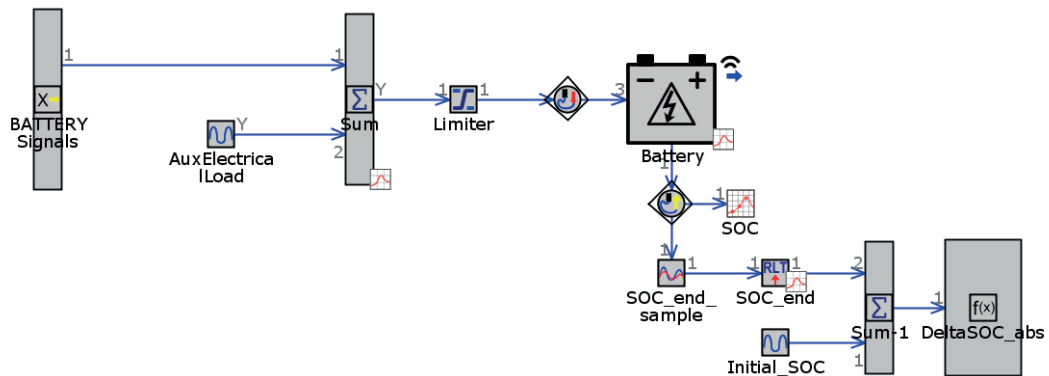
K bloku elektromotoru opět vede signál s aktuálním požadovaným momentem, který je však upraven o převod a teprve poté je poslán elektromotoru (k tomu slouží blok „Divide“ ležící mezi blokem „RSGSignals“ a samotným blokem motoru). Signály ve spodní části slouží jako vstupy pro řídicí strategii. Hodnoty maximálního a minimálního momentu pro dané otáčky jsou zde upraveny na hodnoty ekvivalentní momentu spalovacího motoru.



OBRÁZEK 14: ELEKTROMOTOR

4.2.3 Baterie

Blok baterie (Obrázek 15) je propojen pouze signály. V levé části modelu je veden signál o požadovaném výkonu od elektromotoru, který je upraven o spotřebu elektrických spotřebičů. Pravá část je přípravou pro optimalizaci a jejím výsledkem je rozdíl stavu nabití baterie („Initial_SOC“ a „SOC_end“) na začátku simulace a na jejím konci v absolutní hodnotě. Toto kritérium bude později optimalizováno na nulovou hodnotu.

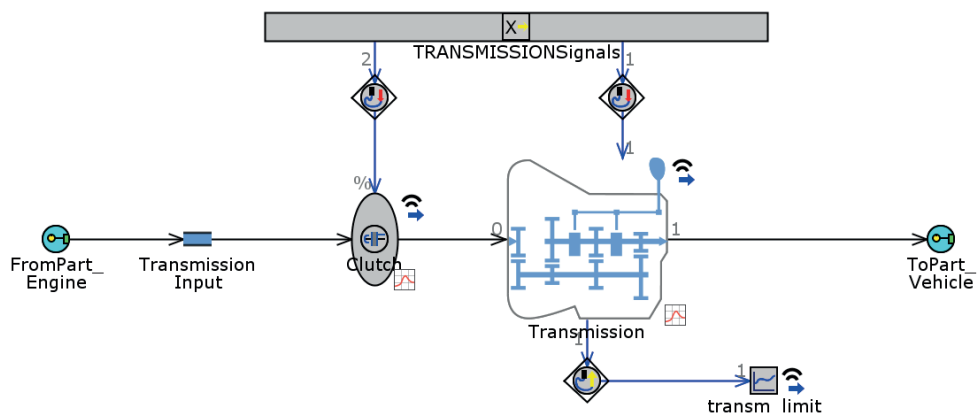


OBRÁZEK 15: BATERIE

4.2.4 Převodovka

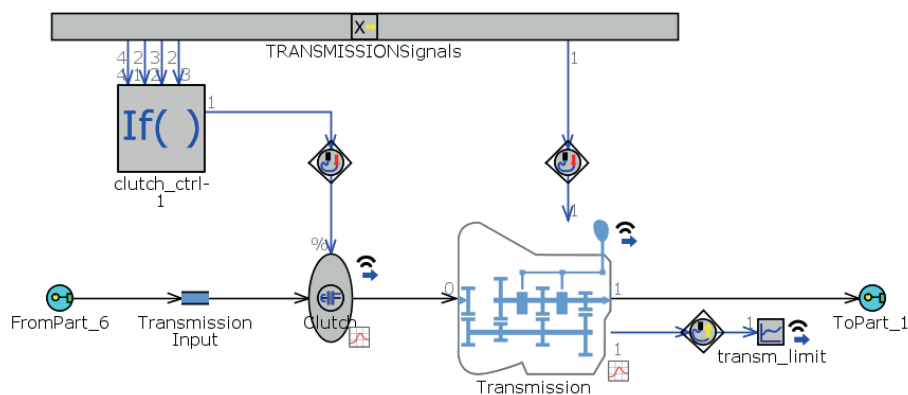
Část převodovky (Obrázek 16) se skládá z prvků (směrem zleva): vstup od spalovacího motoru, hřídel, spojka, převodovka a výstup směrem na diferenciál. Mechanickým vstupem je sečtený moment od spalovacího motoru a elektromotoru. Výstupem je ten samý moment upravený aktuálním převodovým poměrem.

Řídící signály jsou pouze dva, a to stav sepnutí/rozepnutí spojky a údaj o požadovaném převodovém stupni.



OBRÁZEK 16: PŘEVODOVKA – KONCEPT 1

Druhý koncept hybridního vozu se liší řízením spojky (Obrázek 17). Blok „clutch_ctrl-1“ se zabývá tím, aby spojka byla ve správný okamžik spojena anebo rozpojena. Vůz je díky tomu schopný provozu v režimu čistě elektrické jízdy. Spalovací motor může být odpojen a vypnut.

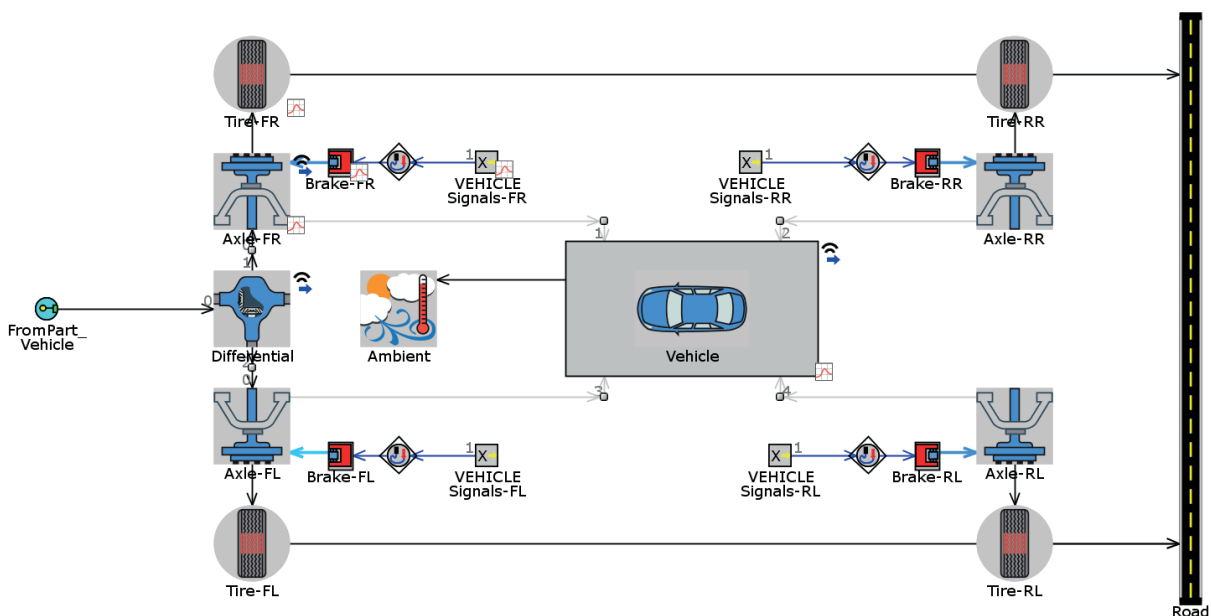


OBRÁZEK 17: PŘEVODOVKA – KONCEPT 2

4.2.5 Vozidlo

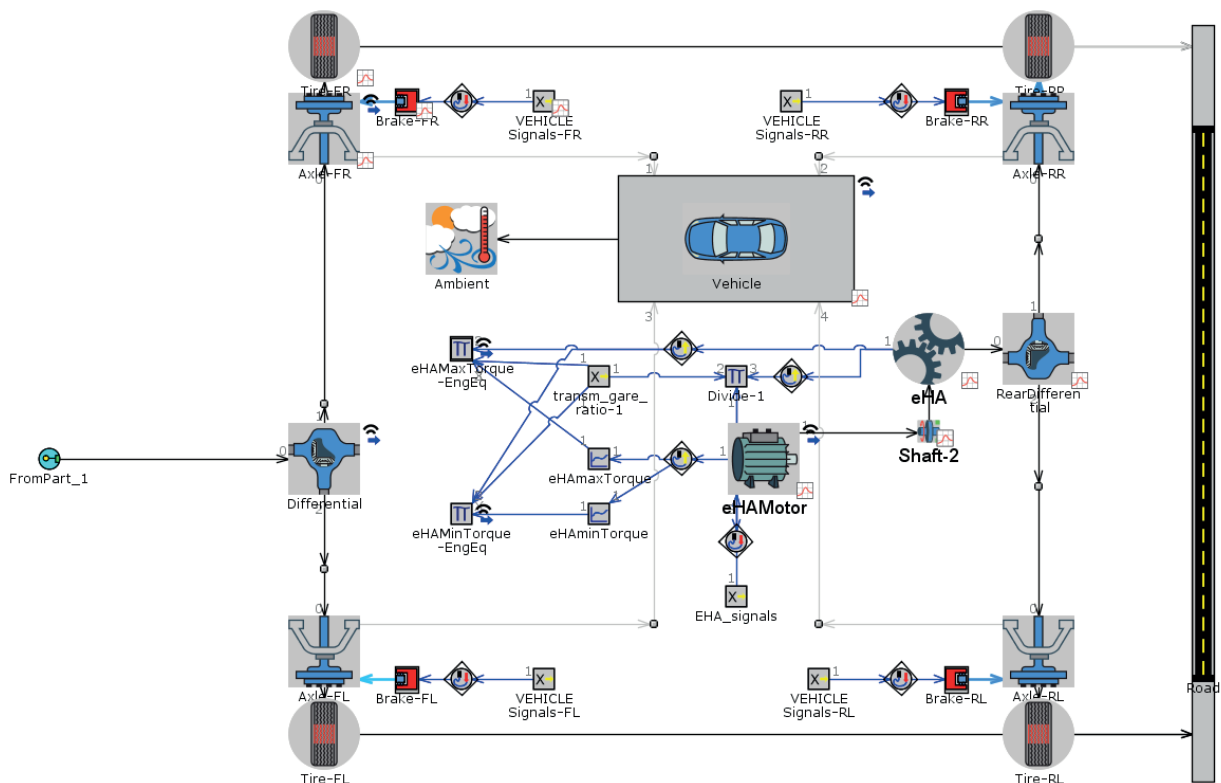
Vozidlo (Obrázek 18) je poslední mechanickou součástí modelu. Na tomto místě jsou zadány některé z nejdůležitějších parametrů pro výpočet odporů vozidla. Jsou to hmotnost vozidla, součinitel odporu vzduchu, čelní plocha vozidla, a parametry kol - dynamický poloměr kol a součinitel valivého odporu.

Vstupem je moment vycházející z převodovky, ten se v diferenciálu rozdělí a pokračuje na kola, v tomto případě jen na přední nápravu. Kola jsou dále spojena s vozovkou, kde je možné pracovat i s prokluzy. Ke kolu jsou připojeny třecí brzdy, ke kterým vede řídicí signál z bloku řízení brzdění. Ve středu je blok vozidla připojený ke všem čtyřem kolům.



OBRÁZEK 18: VOZIDLO – KONCEPT 1

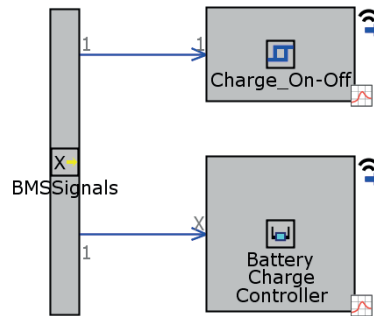
Model vozu druhého konceptu (Obrázek 19) se liší přidáním elektromotoru k zadní nápravě a souvisejícími řídicími signály. Hodnoty aktuálního maximálního a minimálního momentu elektromotoru musí být přepočítány na ekvivalent spalovacího motoru, aby bylo možné s těmito hodnotami v řídicí strategii pracovat. Také požadavek na moment přicházející od řídicí strategie musí být znovu přepočten. Tyto přepočty řeší bloky ve středu obrázku spojené modrými čarami.



OBRÁZEK 19: VOZIDLO S ELEKTRICKOU ZADNÍ NÁPRAVOU – KONCEPT 2

4.2.6 Řízení baterie

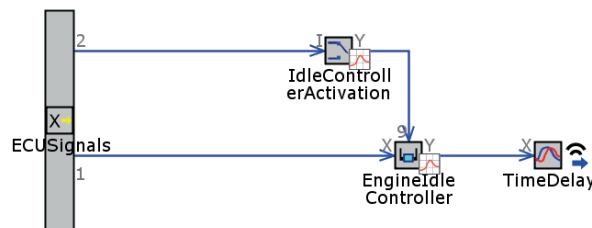
Prvním z bloků zajišťující řízení modelu je blok pro řízení baterie (Obrázek 20). Vstupem je stav nabití baterie. Výstupem je indikátor o tom, jestli se v daném okamžiku může dobíjet (z bloku „Charge_On-Off“ a druhým výstupem (z bloku „Battery Charge Controller“), kolik by se mělo dobíjet, aby baterie byla na určité úrovni stavu nabití (SOC).



OBRÁZEK 20: ŘÍZENÍ BATERIE

4.2.7 Řízení spalovacího motoru

Blok pro řízení spalovacího motoru (Obrázek 21) obsahuje PID regulátor⁴ („EngineIdleController“), který se stará o to, aby spalovací motor držel správně volnoběžné otáčky. Vstupem jsou otáčky motoru a informace od řídicí strategie o aktuálním modu. Na základě něj se teprve PID regulátor aktivuje (o tom rozhodne „IdleControllerActivation“). Výstupem je požadovaný moment pro spalovací motor, který putuje do řídicí strategie.



OBRÁZEK 21: ŘÍZENÍ SPALOVACÍHO MOTORU

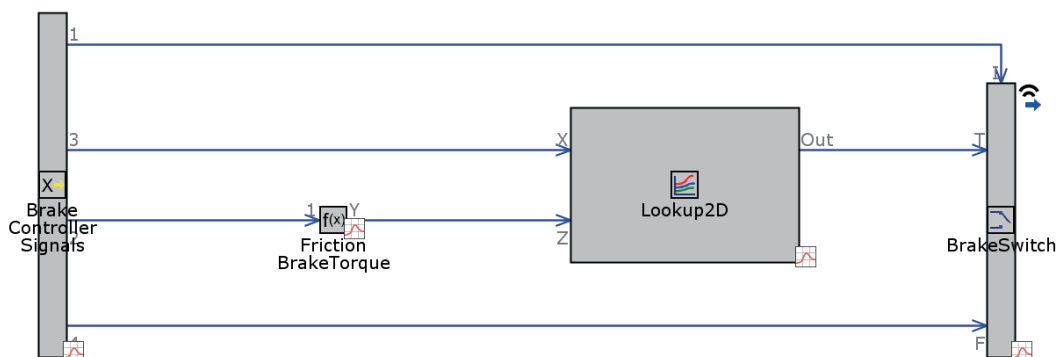
4.2.8 Řízení brzd

Vstupy do této části řízení (Obrázek 22) shromážděné v bloku „BrakeControllerSignals“ jsou: rychlost kol, pozice brzdového pedálu určená řidičem a výstupy řídicí strategie, tj. požadovaný brzdový moment a informace, zda se na brzdy pošle signál od řidiče anebo upravený signál ze strategie. Signál od řídicí strategie se použije v případě regenerativního brzdění, kdy elektromotory nemají dostatečný brzdový účinek a k dodržení rychlostního profilu je potřeba dodatečného brzdového účinku od třecích brzd. O použití signálu od řidiče nebo od řídicí strategie rozhodne blok „BrakeSwitch“, který na základě porovnání vstupu s kontrolním vstupem přepíná mezi výstupy. Blok „FrictionBrakeTorque“ přepočítává požadovaný moment

⁴ PID regulátor – řídicí prvek, složený z proporcionální, integrační a derivační části, který na základě regulační odchylky upravuje akční veličinu na výstupu, která má typicky za cíl korekci skutečnému stavu směrem k ideálnímu.

na brzdění z řídicí strategie na moment potřebný na jednom kole. V bloku „Lookup2D“ se pak tento signál převádí na polohu brzdového pedálu v procentech.

Výstupem je „bezdrátový“ signál pro ovladače brzd ve vozidle.



OBRÁZEK 22: ŘÍZENÍ BRZD

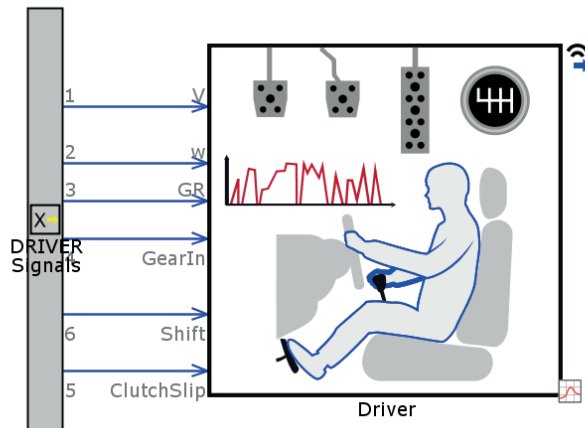
4.2.9 Řidič

Jeden z nejdůležitějších prvků řízení je řidič (Obrázek 23). Jeho úkolem je řídit vozidlo, rozjet ho, řadit podle řídicího programu, a především dodržet požadovaný rychlostní profil. Na tomto místě se do modelu zadá požadovaný rychlostní profil (rychlost v závislosti na čase) a způsob řazení (křivky pro každý převodový stupeň pro přeřazení nahoru a dolů). V tomto případě jsou to křivky rychlosti v závislosti na poloze akceleračního pedálu. Tento blok je na základě znalosti parametrů vozidla schopný vypočítat dané jízdní odpory a požadovaný moment potřebný k pohonu vozidla a k dodržení rychlostního profilu.

Sledování požadované rychlosti je řízeno PI regulátorem. Pro vyhlazení průběhu je možné zadat další parametry například čas, po který řidič bude vědět, jak se rychlost dále vyvíjí, anebo míru „agresivity“, se kterou by měl rychlost sledovat.

Jako vstupy řidič potřebuje informace o rychlosti vozidla, otáčkách motoru, zařazeném rychlostním stupni, aktuálním převodovém poměru, aktuálním prokluzu spojky a indikaci toho, že probíhá řazení.

Výstupy pro ostatní bloky modelu jsou: pozice spojky, požadovaný zařazený stupeň pro převodovku a pro řídicí strategii: požadovaný moment na vstupu do převodovky, indikátor o průběhu řazení a brzdový pedál (také pro řízení brzd).



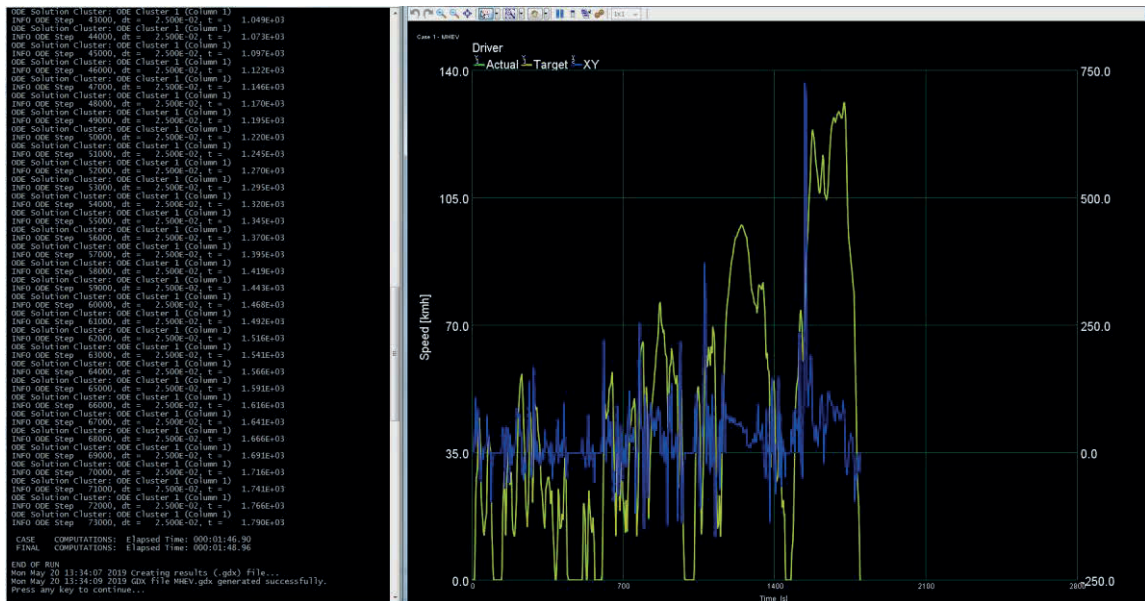
OBRÁZEK 23: ŘIDIČ

4.2.10 Řídící strategie HEV

K řízení modelu v GT může být použito velké množství bloků. V tomto modelu jsou to především bloky typu „IfThenElse“ a „FiniteStateManager“. Oba víceméně dělají to samé, jen trochu jiným způsobem. V bloku „IfThenElse“ jsou definovány stavy, akce, podmínky (při kterých bude daný stav aktivní) a pro každý stav výstupy. „FiniteStateManager“ prvně definuje jednotlivé stavy a pro každý z nich výstupy a teprve ve druhé tabulce jsou definovány přechody mezi těmito stavy a za jaké podmínky k přechodu dojde. Strategie řízení obou konceptů hybridních vozů bude podrobně popsána v kapitole 5.

4.3 Průběh simulace a porovnání výsledků pro konvenční vůz

Již v průběhu výpočtu umožňuje GT Suite sledovat průběh veličin, které si zvolíme (viz Obrázek 24). V tomto případě je to rychlost vozidla. Sledovat lze také aktuální velikost integračního kroku a výpis zpráv o začátku výpočtu, průběhu a o jeho konci (varování, důvody předčasného ukončení).

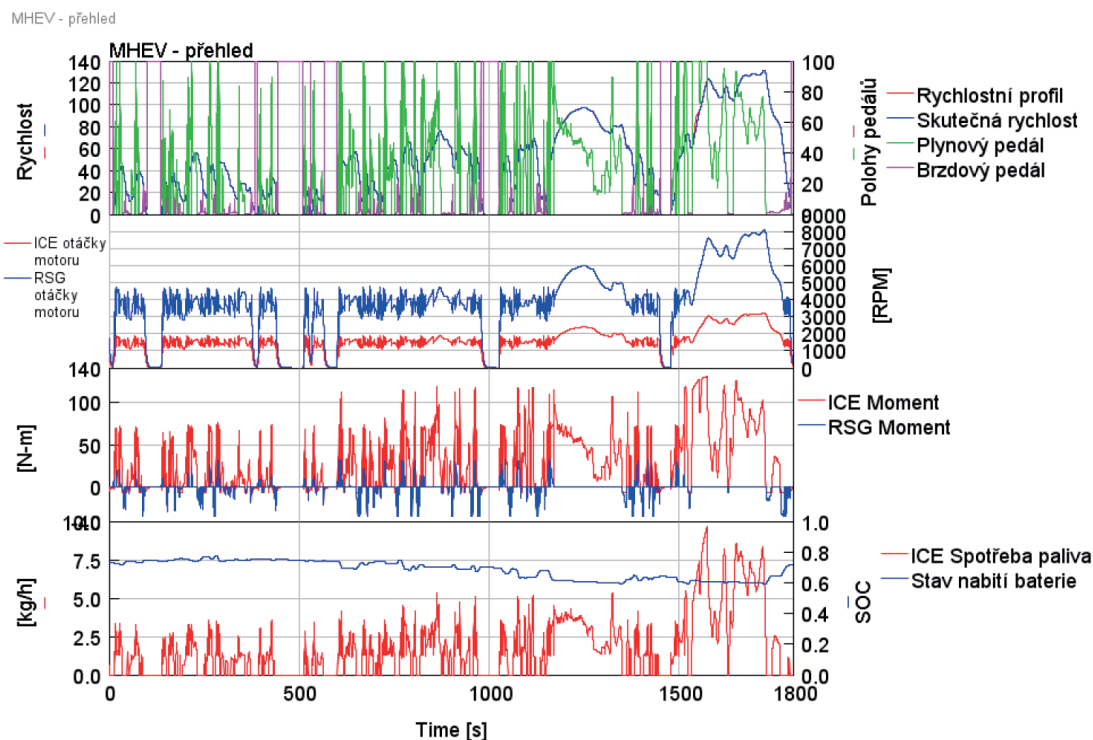


OBRAZEK 24: PRŮBĚH VÝPOČTU

Výsledky jsou po dokončení výpočtu k dispozici ve zvláštním souboru. Takto uložit lze vstupy a výstupy všech bloků a další jejich vlastnosti.

Pro tuto práci jsou nejdůležitější data o požadované a aktuální rychlosti vozidla, o poloze sešlápnutí pedálů (plynový, brzdový a spojka), o momentu poskytovaném spalovacím motorem a elektromotorem a o aktuální spotřebě paliva a stavu nabití baterie. Tato data v grafu jsou na obrázku níže (Obrázek 25). V první části je rychlost v km/h, současně s polohami pedálů, v druhé části grafu jsou otáčky spalovacího motoru (ICE) a elektromotoru (RSG), ve třetí momenty obou motorů a ve spodní části je vykreslena aktuální spotřeba v kg/h a zároveň průběh stavu nabití baterie (SOC).

Další užitečné údaje mohou být např. výstupy z kontrolní strategie, aktuální zařazený stupeň, výkon jednotlivých motorů, moment přenesený na kola a podobně. Zajímavé je také zobrazení pracovních bodů v úplné charakteristice spalovacího motoru nebo v mapě účinnosti elektromotoru (viz například Obrázek 27).



OBRÁZEK 25: BĚŽNÉ ZOBRAZENÍ DAT

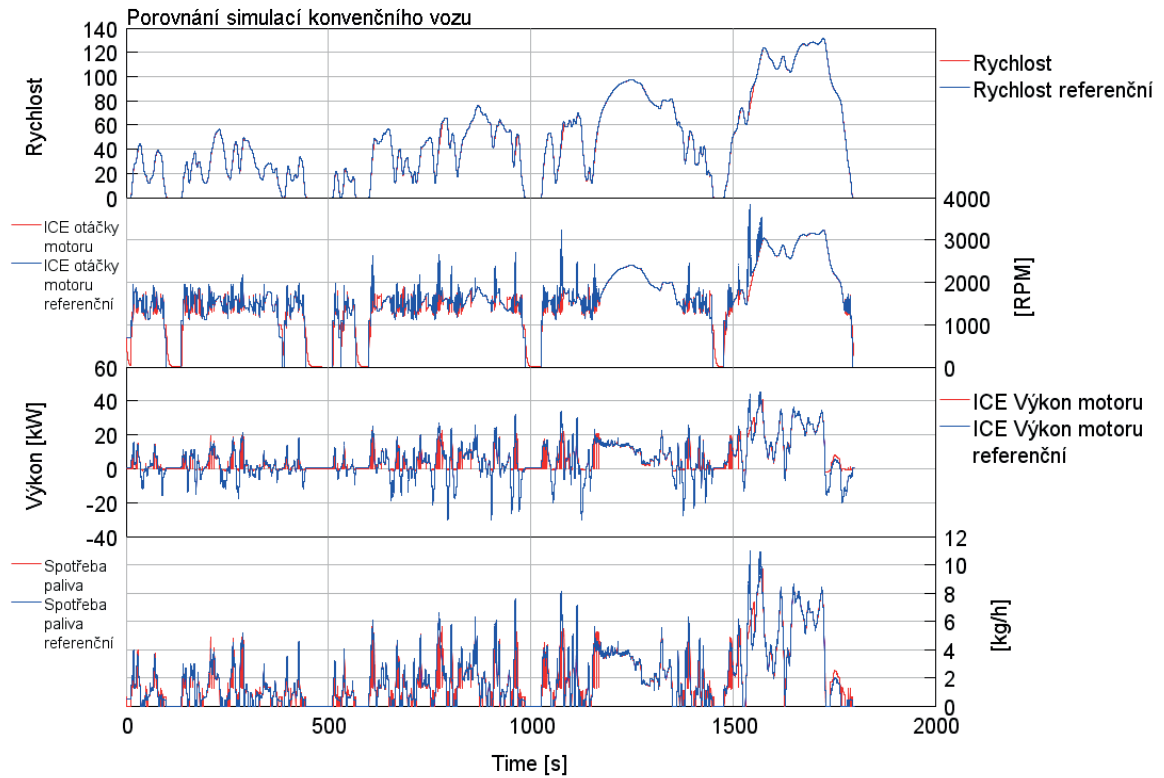
4.4 Porovnání výsledků konvenčního vozu

V první fázi byla spuštěna simulace modelu konvenčního vozu v jízdním cyklu WLTP. Tento vůz je schopný využívat systém Start-stop (během každého stání vypíná spalovací motor) a během zpomalování stejně jako reálné vozy přerušuje dodávku paliva a motor do určitých otáček nechá volně protáčet. Celková přepočtená spotřeba za takto projetí cyklus WLTP je 5.54 l/100 km. Což se od výsledku ze standardizovaného interního SW⁵ (5.60 l/100 km) liší o 0.06 l/100 km (viz Tabulka 2). Nejvýznamnější údaje z projetí cyklu jsou vykresleny níže červenou barvou (Obrázek 26). Modrou barvou jsou v tomto grafu vykresleny jako referenční hodnoty výsledky ze standardizovaného SW.

TABULKA 2: POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ SIMULACE KONVENČNÍHO VOZU

Vůz	Spotřeba [l/100 km]
Model ICEV	5.54
Referenční model ICEV	5.60

⁵ Standardizovaný interní SW – je SW používaný interně k výpočtům spotřeb a jízdní dynamiky sériových konvenčních vozů v koncernu Volkswagen.



OBRÁZEK 26: POROVNÁNÍ SIMULACÍ KONVENČNÍHO VOZU

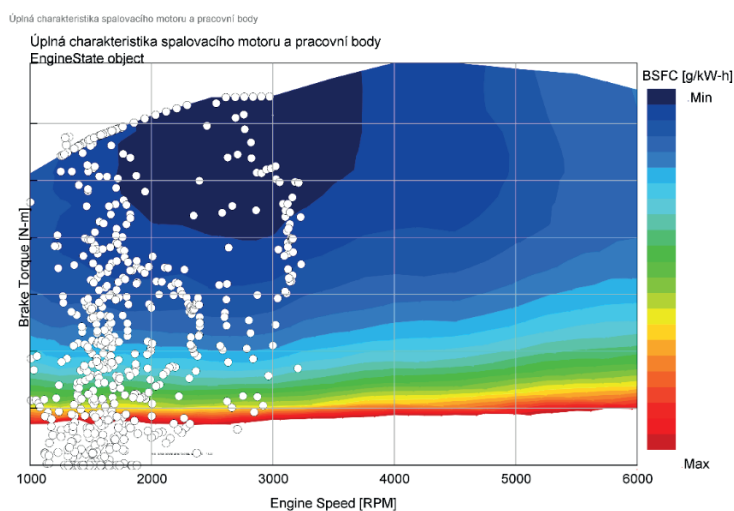
Simulované hodnoty velmi dobře sledují referenční hodnoty a rozdíl výsledných spotřeb je velmi malý, proto lze tento model konvenčního vozu využít jako referenční a úspory hybridizace vztahovat k těmto výsledkům.

5 Řízení a jeho optimalizace

Pro aplikaci řízení ve vozidle je třeba vybrat metodu, která dokáže pracovat v reálném čase a pouze na základě dat z daného okamžiku, případně z historických průběhů. Řídící algoritmus dopředu nezná průběh rychlosti. Zvolená metoda také musí být vhodná pro aplikaci ve vozidle i z hlediska náročnosti na výpočetní výkon. Metody používané pro tyto účely jsou popsány v kapitole 3.

Z těchto důvodů byla pro řízení hybridního vozu vybrána metoda řízení založená na podmínkách (rule-based). Na základě definovaných pravidel řídicí jednotka vozu rozhoduje, který mód má být v každém okamžiku použit. Metoda založená na pravidlech je jednoduše aplikovatelná ve vozidle, a je lehká pochopitelná. Pravidla mohou být definovaná na základě rychlosti nebo na základě požadavku na moment a jeho vztahu ke křivce maximálního momentu spalovacího motoru. Pro řízení hybridního vozu v této práci jsem zvolila druhý přístup, tedy řízení na základě vztahu ke křivce maximálního momentu spalovacího motoru.

Úspory paliva u hybridních vozů plynou z několika zdrojů. Prvním a nejvýznamnějším zdrojem je energie, kterou je během každého brzdění elektromotor schopný v generátorickém režimu uložit do baterie, místo aby tato energie byla zmařena ve třecích brzdách. Druhým zdrojem úspory je pak posunutí pracovních bodů spalovacího motoru do oblastí s vyšší účinností. Tato oblast u spalovacího motoru je většinou ve vyšším zatížení a ve středním rozsahu otáček, jak je vidět v úplné charakteristice spalovacího motoru (Obrázek 27). Na tomto grafu je v závislosti na otáčkách motoru (osa x) a aktuálním zatížení motoru (osa y) vykreslena měrná spotřeba paliva. V oblastech znázorněných modrou barvou je měrná spotřeba paliva nejmenší. Právě těmito oblastem je výhodné se řízením přiblížit.



OBRÁZEK 27: ÚPLNÁ CHARAKTERISTIKA SPALOVACÍHO MOTORU A PRACOVNÍ BODY VE WLTP⁶

⁶ Osy grafu nejsou popsány z důvodu utajení

Pracovní bod se blíž k těmto oblastem může dostat několika způsoby. Pracovní body jsou znázorněny například na obrázku výše (Obrázek 27). Jedním ze způsobů, jak toho dosáhnout, je s pomocí elektromotoru měnit požadované zatížení. Elektromotor může spalovací motor buďto podpořit („boostovat“) a přitom vybijet baterii anebo naopak ho více zatížit a baterii dobít. V rozsahu otáček (ve směru osy x) je možné pracovní bod posouvat úpravou řazení.

Koncept 1 hybridního vozu (MHEV) dokáže pracovat pouze se zapnutým spalovacím motorem. Kvůli způsobu zapojení elektromotoru až za spalovací motor nelze vozidlo pohánět čistě elektricky, a jediné režimy ve kterých může pracovat jsou: rekuperace, boost (asistence spalovacímu motoru) a případně nabíjení za jízdy. Z těchto pouze boost je režim, který vybíjí baterii, zatímco rekuperace a nabíjení stav nabití baterie zvyšují. Rekuperace navíc baterii nabíjí skoro „zadarmo“, protože využívá energii, která se v konvenčních vozech maří na brzdách. Na druhou stranu nabíjení spalovacím motorem zvyšuje okamžitou spotřebu paliva.

Řídicí strategii jsem se snažila navrhnout tak, aby stav nabití baterie (SOC) po projetí jízdního cyklu byl stejný jako na jeho začátku a zároveň, aby vozidlo během brzdění rekuperovalo co nejvíce. Pro splnění obou těchto předpokladů je nutné v módu Boost využít přesně tolik energie, kolik se jí během brzdění dobije. Proto míra boostování bude určena konstantou určenou optimalizací pro daný vůz.

Koncept MHEV+ (2) se od prvního konceptu liší tím, že má k dispozici jeden elektromotor na zadní ose navíc a je díky němu schopný čistě elektrické jízdy. Ve strategii proto přibude další konstanta.

Řízení obou konceptů je popsáno níže.

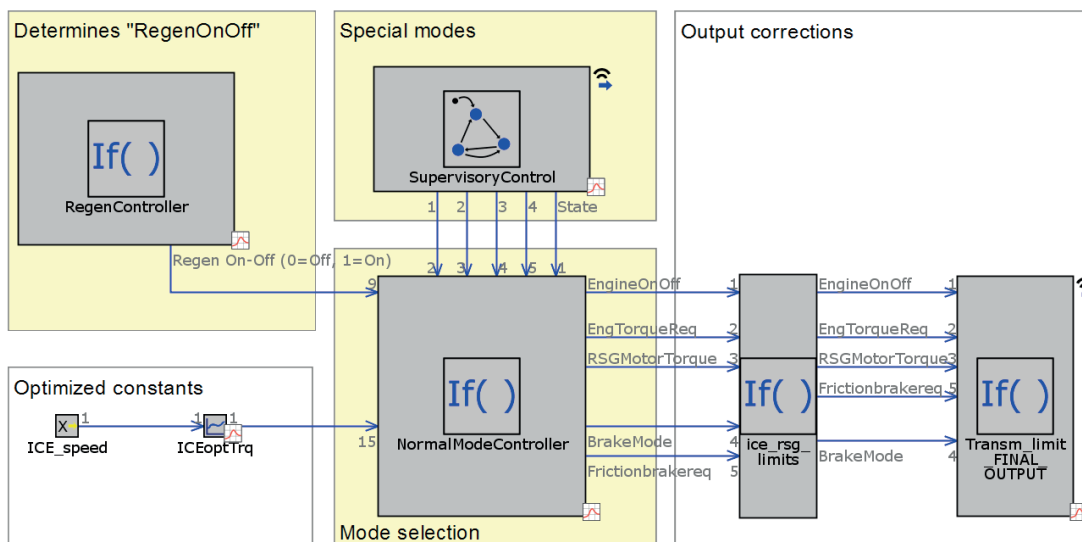
5.1 MHEV – řídicí strategie (koncept 1)

Tento koncept dokáže pouze rekuperovat, boostovat a při nízkém stavu nabití baterie dobíjet za jízdy. Rekuperace by měla být aktivní ideálně během každého brzdění. Jedině při příliš vysokém stavu nabití baterie musí být rekuperace zakázaná, aby nedošlo k poškození baterie. Boost se snaží takto získanou energii co nejefektivněji využít a uspořit palivo. Míra jeho využití – konstanta bude určena optimalizací.

Vstupními parametry do řízení jsou zejména rychlost vozidla, požadovaný moment, otáčky motorů, maximální a minimální moment jednotlivých motorů, stav nabití baterie (SOC). Na základě těchto vstupů algoritmus určí, který režim je pro vozidlo nejvýhodnější. Výstupem řízení je pak aktuální rozdělení momentu mezi jednotlivé motory. Doplnujícími výstupy může být například informace o sepnutí nebo rozepnutí spojky v systému. V tomto modelu je pouze jedna spojka mezi spalovacím motorem a převodovkou a k jejímu rozepnutí dochází během řazení a zastavení.

5.1.1 Řídící strategie v modelu

Řídící strategie se skládá s těchto bloků (viz Obrázek 28): „RegenController“, „SupervisoryControl“, „NormalModeController“, „ice_rsg_limits“, „transm_limit_FINAL_OUTPUT“ a „ICEoptTrq“.



OBRÁZEK 28: ŘÍDÍCÍ STRATEGIE MHEV

„RegenController“ rozhoduje pouze o tom, zda je v daný okamžik dovoleno rekuperovat na základě stavu nabití baterie, polohy spojky, otáček motoru, požadovaného momentu a minimálního momentu elektromotoru.

„SupervisoryControl“ řídí všechny speciální, většinou přechodové stavy. Tyto stavy zajišťují stání vozidla s vypnutým spalovacím motorem, stání s motorem běžícím na volnoběh, start motoru za jízdy, start motoru pokud vozidlo stojí na místě.

„NormalModeController“ se pak zabývá tím nejdůležitějším. V případě, že „SupervisoryControl“ neřídí žádný ze speciálních stavů, tento blok se na základě hodnoty požadovaného momentu stará o zvolení módu a vysílá výstupy odpovídající těmto módům.

Poslední dva bloky diagramu (Obrázek 28) se zabývají konečnými úpravami výstupů. První z nich zajišťuje, aby nebyl požadavek na moment od jakéhokoli motoru větší než ten, co dokáže poskytnout. Druhý pracuje s omezeními převodovky.

Strategie se rozhoduje mezi těmito módy: Boost, rekuperace a nabíjení za jízdy. Rekuperace a Boost jsou dále rozděleny pro některé specifické případy. Přehled módů a podmínek vstupu je níže (viz Tabulka 3).

TABULKA 3: TABULKA MÓDŮ

Provozní módy		Podmínky
Not in Normal Mode	If	Mode!=5
ICE+RSG max boost	Elseif	DriverTorque > (EngMaxTorque+RSGMaxTorque) && SOC > [SOCboostmin] && gear < [gearlimit]
RSG max Boost	Elseif	DriverTorque > ((EngMaxTorque*ICEoptTrq) + RSGmaxTorque) && SOC > [SOCboostmin] && gear < [gearlimit]
ICEopt Boost	Elseif	DriverTorque > (EngMaxTorque*ICEoptTrq) && SOC > [SOCboostmin] && gear < [gearlimit]
Regen Braking	Elseif	DriverTorque < EngMinTorque && RegenState == 1
Braking - No Regen clutch	Elseif	DriverTorque < EngMinTorque && shiftind == 1
Braking - No Regen	Elseif	DriverTorque < EngMinTorque && RegenState == 0
Braking - Mixed (motor limited)	Elseif	DriverTorque < EngMinTorque && RegenState == 2
Driving and Charging	Elseif	DriverTorque < EngMaxTorque && ChargeState ==3
Normal Mode	Else	

Konstantní hodnota, kterou je vynásobena křivka maximálního momentu spalovacího motoru a tvoří tak pomyslnou křivku optimálního výkonu (více ke vzniku této křivky je v odstavci 5.1.2), je využita v módu: „ICEopt Boost“ a „RSG max Boost“⁷.

Základní verzí Boostu je „ICEoptBoost“. Cílem tohoto módu je udržet zatížení motoru na optimální hodnotě. Tato křivka se využije, pokud se požadovaný moment nachází mezi křivkou optimálního momentu a křivkou maximálního momentu spalovacího motoru. Moment, o který se snížilo zatížení spalovacího motoru, doplní elektromotor.

Druhá verze boostu („RSG max Boost“) se využije, pokud požadovaný moment je větší než součet optimálního momentu spalovacího motoru a maximálního momentu elektromotoru. V tomto případě elektromotor poskytuje maximální moment, jaký dokáže a spalovací motor ten zbývající do požadovaného momentu.

Poslední verze boostu („ICE+RSG max boost“) je určena pro případy, kdy je moment požadovaný řidičem vyšší než ten, který oba motory v součtu dokáží poskytnout. Výsledný požadovaný moment od obou motorů je jejich maximální moment.

⁷ RSG je zkratka pro Riemengetriebene Startergeneratoren a označuje slabý elektromotor zapojený místo startéru a spojený řemenem.

Jako je boost dělen do tří skupin, tak je na několik úrovní dělena i rekuperace podle výše požadovaného brzdného momentu.

Módy pro rekuperaci jsou také děleny podle toho, jestli elektromotor zvládne celý požadavek pokrýt sám („Regen Braking“), anebo je potřeba použít i třecí brzdy („Braking Mixed). Další dva módy „Braking - No Regen“ a „Braking – No Regen clutch“ se využijí v případech, kdy je plně nabitá baterie, a nebo je sice požadovaný moment záporný, ale elektromotor není schopný rekuperace, například v okamžicích, kdy je rozepnutá spojka.

Základní je mód „Regen Braking“, ten se použije v ideálním případě během každého brzdění. Spalovací motor se protáčí naprázdno a všechen brzdný účinek (po odečtení ztrát ICE a převodů) elektromotor zvládne zachytit a dobít jím baterii. Tento mód kvůli způsobu zapojení může být aktivní jen dokud otáčky spalovacího motoru neklesnou pod volnoběžné otáčky. Pak musí být rekuperace vypnuta a vše je dobrzděno třecími brzdami.

Mód v tabulce uvedený na prvním místě je aktivní v případě zvláštních stavů, kdy o výstupech rozhoduje „SupervisoryControl“ blok. V takovém případě jsou vstupy bez úpravy poslány jako výstupy.

Mód „Driving and Charging“ se použije pouze v případě, že je stav nabití baterie velmi nízký a je jí potřeba za jízdy dobít.

„Normal Mode“ je v tabulce pro případy, kdy není možné zvolit žádný z předchozích módů.

Tabulka 4 obsahuje pro každý mód odpovídající výstupy. V každém sloupci je jeden z výstupů: Stav zapnutí/vypnutí spalovacího motoru (ICE), požadovaný moment po spalovacím motoru, požadavek momentu po elektromotoru (RSG), aktuální brzdný mód (informace, jestli se signál vedoucí na brzdy musí přepočítat nebo se použije signál přímo od řidiče) a velikost momentu požadovaného po brzdách. Celkový moment požadovaný řidičem je zde označen jako „DriverTorque“. V některých případech je požadovaným momentem maximální možný moment daného motoru (například „EngMaxTorque“ pro maximální moment spalovacího motoru).

TABULKA 4: TABULKA VÝSTUPŮ PRO JEDNOTLIVÉ MÓDY

Mód	Výstup 1 ICE on/off	Výstup 2 ICE Moment	Výstup 3 RSG Moment	Výstup 4 Brzdný mód	Výstup 5 Brzdný moment
Not in Normal Mode	EngineOnOff	EngTorqueReq	RSGTorqueReq	BrakeMode	0
ICE+RSG max boost	1	EngMaxTorque	RSGmaxTorque	1	0
RSG max Boost	1	DriverTorque - RSGmaxTorque	RSGmaxTorque	1	0
ICEopt Boost	1	EngMaxTorque * ICEoptTrq	DriverTorque - (EngMaxTorque * ICEoptTrq)	1	0
Regen Braking	0	0	DriverTorque - EngMinTorque	0	0
Braking - No Regen clutch	0	0	0	1	0
Braking - No Regen	0	0	0	0	DriverTorque - EngMinTorque
Braking - Mixed (motor limited)	0	0	RSGMinTorque	0	DriverTorque - EngMinTorque - RSGMinTorque
Driving and Charging	1	DriverTorque + ChargeTorque	ChargeTorque	1	0
Normal Mode	1	DriverTorque	0	1	0

5.1.2 Konstantní hodnoty a další vstupy pro optimalizaci

Cílem optimalizace je získání takových konstant, aby vozidlo jelo s co nejmenší spotřebou, a zároveň aby SOC bylo na konci cyklu stejně vysoké, jako bylo na začátku jízdy. Pro tuto úlohu je z metod implementovaných do SW GT Suite nejvhodnější optimalizační metoda s využitím genetických algoritmů.

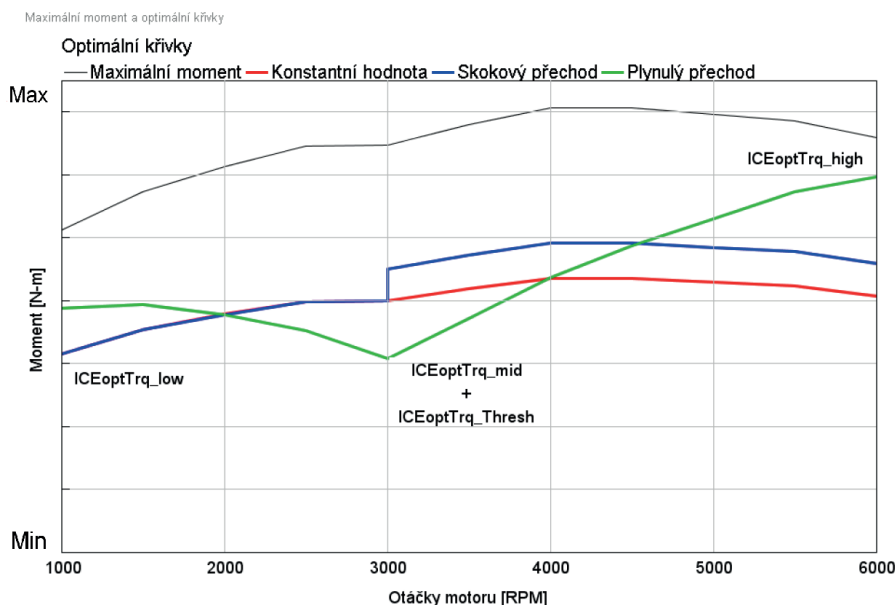
Vstupem do řízení je konstanta (případně několik konstant), kterou se vynásobí maximální moment spalovacího motoru, vznikne tak křivka optimálního momentu, která je využita pro rozhodování o použití módu Boost a pak o výši rozděleného momentu pro jednotlivé motory.

Optimalizace byla spuštěna pro tři různé varianty (viz Obrázek 29):

- Konstantní hodnota (na obrázku červeně)
 - o Jedna hodnota – ICEoptTrq_low
- Skokový přechod mezi konstantními hodnotami (na obrázku modře)
 - o mezi dvěma konstantami – „ICEoptTrq_low“ a „ICEoptTrq_high“ pro oblast nízkých otáček motoru a pro oblast s vyššími otáčkami s přelomem v hodnotě „RPM_Thresh“, ke změně křivky optimálního momentu dochází „skokově“

- Plynulý přechod mezi konstantními hodnotami (na obrázku zeleně)
 - o varianta s třetí konstantou „ICEoptTrq_mid“ pro střední otáčky „RPM_Thresh“, křivka optimálního momentu se směrem ke druhé konstantě mění plynule

Tyto proměnné jsou vstupy pro optimalizaci.



OBRAZEK 29: MAXIMÁLNÍ MOMENT MOTORU A OPTIMÁLNÍ KŘIVKY

Výsledné křivky jsou označené za optimální a moment spalovací motor by měl být během režimu boost vždy snížen na tyto hodnoty. Jedině v režimu „ICE+RSG max boost“, kdy je požadován moment vyšší, než je celý systém schopný poskytnout, je i po spalovacím motoru požadován jeho maximální moment.

Posledním vstupem je omezení převodového stupně, na který je ještě možné Boost využít (proměnná „gearlimit“). Očekává se, že největší účinek bude boost mít v nízkých otáčkách na první a druhý převodový stupeň, a že se nevyplatí ho využívat na nejvyšší převodové stupně. Tabulka 5 obsahuje všechny vstupy optimalizace pro tento koncept i s jejich rozsahy.

TABULKA 5: OPTIMALIZOVANÉ KONSTANTY

Proměnné	ICEoptTrq_low	ICEoptTrq_mid	ICEoptTrq_high	ICERPM_Thresh	gearlimit
Spodní limit	0.4	0.4	0.5	900	2
Horní limit	1	1	1	3300	8
Pouze celá čísla	off	off	off	off	on

Optimalizované hodnoty jsou: celkově spotřebované palivo a rozdíl mezi počáteční a konečnou hodnotou stavu nabití baterie (viz Tabulka 6).

TABULKA 6: CÍLE OPTIMALIZACE

Optimalizované hodnoty	Cíl optimalizace
Celkově spotřebované palivo	Minimalizace
Rozdíl konečného SOC od počátečního SOC	Minimalizace

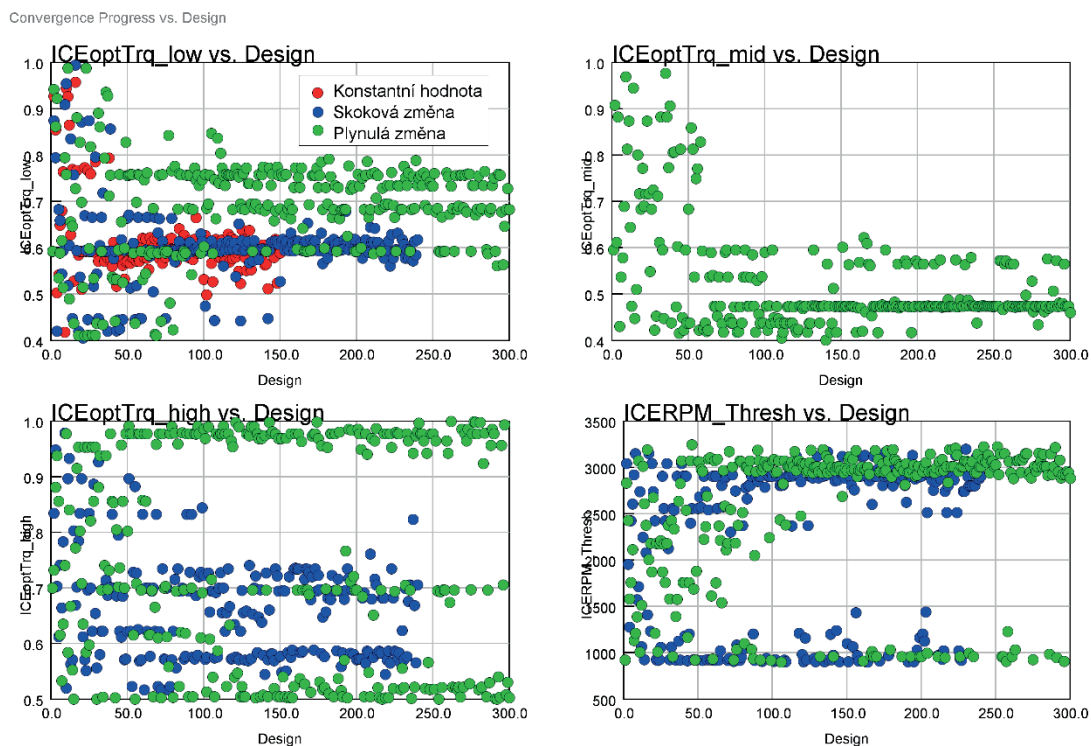
Optimalizaci lze také nastavit omezení. V tomto případě je cílem projet jízdní cyklus s minimálním rozdílem SOC na začátku a na konci, proto je tato hodnota v omezeních (Tabulka 7). Optimalizátor automaticky vyřazuje řešení, která tomuto omezení nevyhovují

TABULKA 7: OMEZENÍ PRO OPTIMALIZACI

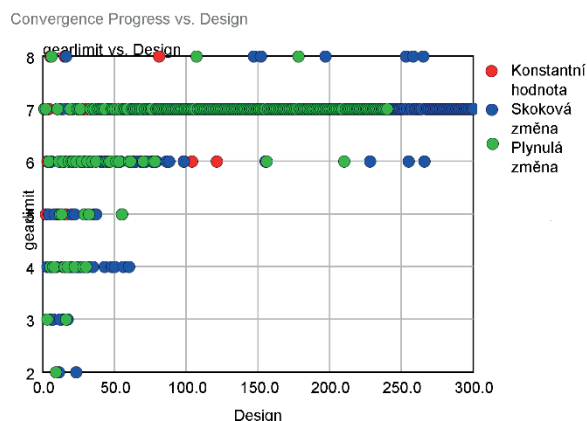
Omezení	Interval
Rozdíl konečného SOC od počátečního SOC	<-0.1;+0.1>

5.1.3 Průběh optimalizace

Na následujících obrázcích (Obrázek 30 a Obrázek 31) je zobrazený postup optimalizace pomocí genetických algoritmů pro tři varianty. Na obrázcích jsou vykresleny všechny výpočty, které proběhly. Je na nich zřetelně vidět, že algoritmus nejdříve volil hodnoty z celého rozsahu a po proběhnutí určitého počtu výpočtů (Designů) se hodnoty ustálily v mnohem menším rozsahu.



OBRÁZEK 30: PRŮBĚH OPTIMALIZACE – PROMĚNNÉ



OBRAZEK 31: PRŮBĚH OPTIMALIZACE – PROMĚNNÁ „GEARLIMIT“

Výpočet s jednou konstantní hodnotou byl nejjednodušší. Pro tento případ byla proměnné pouze dvě (vykreslené červenou barvou - Obrázek 30 a Obrázek 31) – „ICEoptTrq_low“ a „gearlimit“ pro omezení boostu pro vyšší převodové stupně. Cíle optimalizace a její omezení jsou stejné. Díky nižšímu počtu proměnných stačí menší počet výpočtů a volený rozsah je v pozdějších generacích čím dál tím menší a ustálí se přibližně na hodnotách kolem 0.6 (Obrázek 30).

Pro výpočet se skokovou změnou optimálního momentu je situace o něco složitější. Bylo možné pohybovat hodnotou pro oblast s nižšími otáčkami a s hodnotou pro vyšší otáčky, ale také s otáčkami, kterými se tyto oblasti dělí. Výsledky nejsou jednoznačné. Hodnoty limitních otáček motoru pro rozdělení intervalů vyšly kolem 1000 otáček za minutu, anebo kolem 3000. Volit limit na 3000 však nedává smysl, protože v cyklu se tak vysoké otáčky skoro nevyužijí. Hodnota pro optimální moment v nízkých otáčkách je stejně jako v prvním případě kolem 0.6. Hodnota pro vysoké otáčky se využije pouze pro několik málo úseků na konci jízdního cyklu.

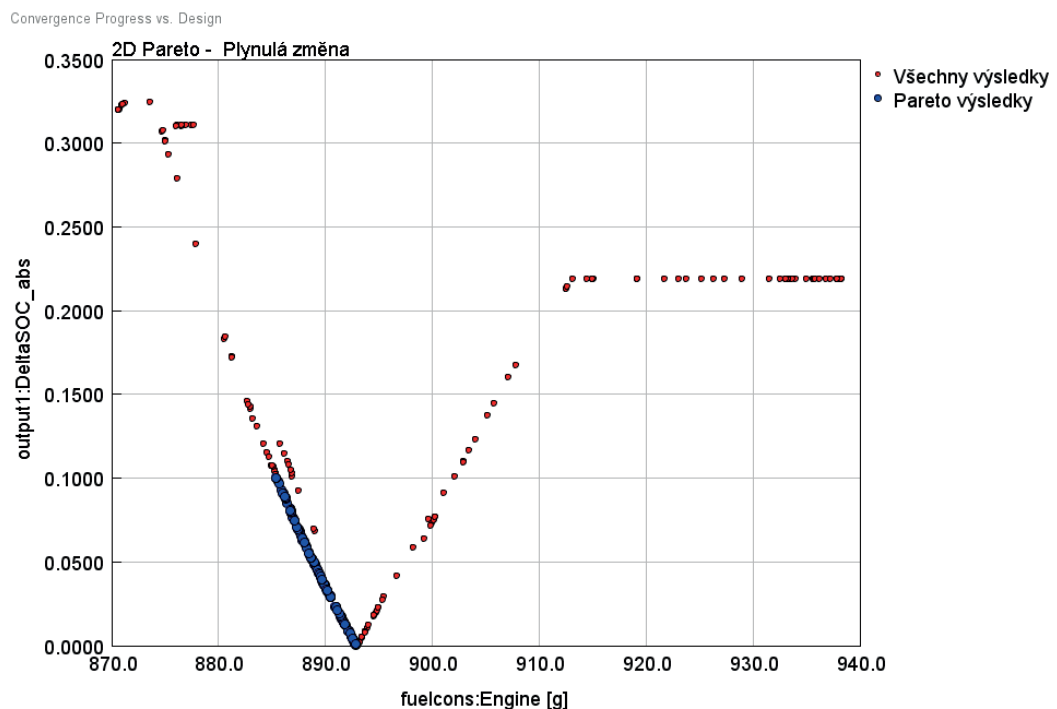
Výpočet s plynulou změnou došel k podobným závěrům. Limit otáček pro změnu je nejuvhodnější kolem 3000 a to znamená, že v tomto případě nejvyšší hodnota nebude vůbec využita. Oproti předchozí možnosti přibyla jedna proměnná pro střední část – tedy pro limitní otáčky. Na tuto hodnotu se plynule mění hodnota pro nízké otáčky. Z výsledků (Obrázek 30) není příliš jasné jaké hodnoty zvolit. Pro další hodnocení jsou vybrána ta řešení, která splnila podmínku nulové změny SOC.

Pro poslední proměnnou „gearlimit“ tedy omezení použití boostu zařazeným stupněm ve všech třech možnostech vyšlo, že by měl boost být používán jen pro stupně nižší než 7 (Obrázek 31).

Pro některé hodnoty optimalizátor dokázal vybrat jejich optimální výši. Pro některé ze zvolených proměnných však ne. Jejich optimální hodnota nemohla být nalezena například proto, že závislost výsledku na nich je mnohonásobně menší než na ostatních proměnných.

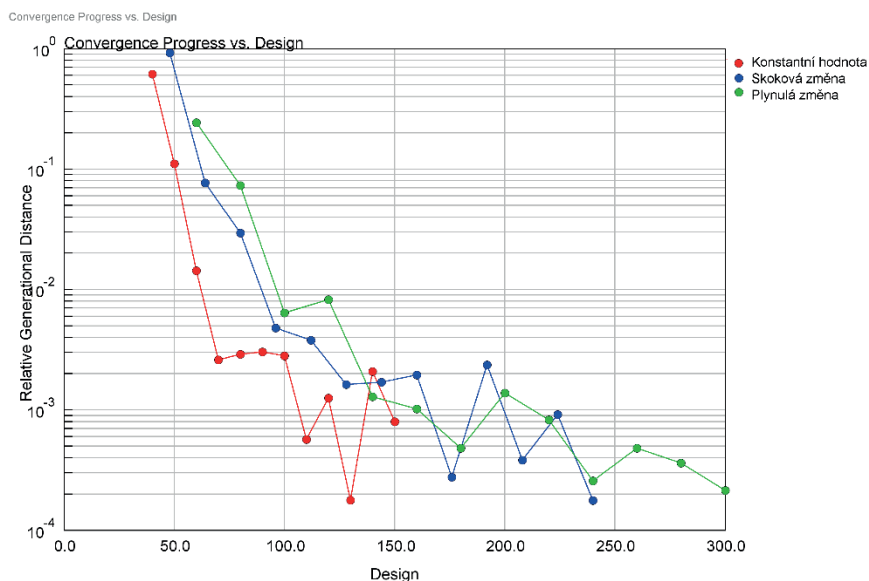
5.1.4 Výsledek optimalizace

Výsledkem optimalizace se dvěma kritérii je Pareto množina výsledků. Jsou to takové výsledky, které leží na okraji prostoru všech výsledků a dosáhly nejlepších hodnot obou kritérií (Obrázek 32). Pareto množina je znázorněna modrou barvou. Z této množiny jsou vybrána ta nejlepší řešení. V tomto případě ta, která skončila s nulovou deltou SOC na začátku jízdního cyklu a na jeho konci. Na obrázku (Obrázek 32) jsou vykresleny všechny proběhlé výpočty v závislosti na kumulované spotřebě paliva (fuelcons:Engine[g]) na ose x a na rozdílu konečného SOC od počátečního (output1:DeltaSOC_abs) na ose y.



OBRAZEK 32: PARETO MNOŽINA VÝSLEDKŮ

Průběh optimalizace lze sledovat také v grafu konvergence k řešení (Obrázek 33). Čím menší je relativní vzdálenost mezi řešeními v dané generaci, tím blíže je výpočet optimálnímu výsledku. Na ose x jsou znázorněny proběhlé výpočty („Design“), na ose y je relativní vzdálenost mezi generacemi a body jsou vykreslené pro každou generaci.



OBRÁZEK 33: PRŮBĚH OPTIMALIZACE – KONVERGENCE

Pro každou z variant bylo vybráno jedno řešení (viz Tabulka 8). I přes to, že byly zvoleny různé metody určení křivky optimálního momentu, jsou si všechna řešení velmi podobná. Druhá a třetí řešení pro jednotlivé varianty se také liší velmi málo, proto zde již nejsou uvažována.

TABULKA 8: VÝSLEDKY PRO TŘI VARIANTY OPTIMALIZACE MHEV

	Číslo výpočtu	Kumulovaná spotřeba paliva [g]	delta SOC [-]	ICEoptTrq_low	ICEoptTrq_mid	ICEoptTrq_high	ICERPM_Thresh	gearlimit	Výsledná přepočtená spotřeba [l/100km]	gCO ₂ /km
Konstantní hodnota	120	893	0.00	0.617	-	-	-	7	5.1380	117.1
Skokový přechod	125	893	0.00	0.616	-	0.696	2910	7	5.1371	117.1
Plynulý přechod	234	893	0.00	0.762	0.475	0.965	3070	7	5.1377	117.1

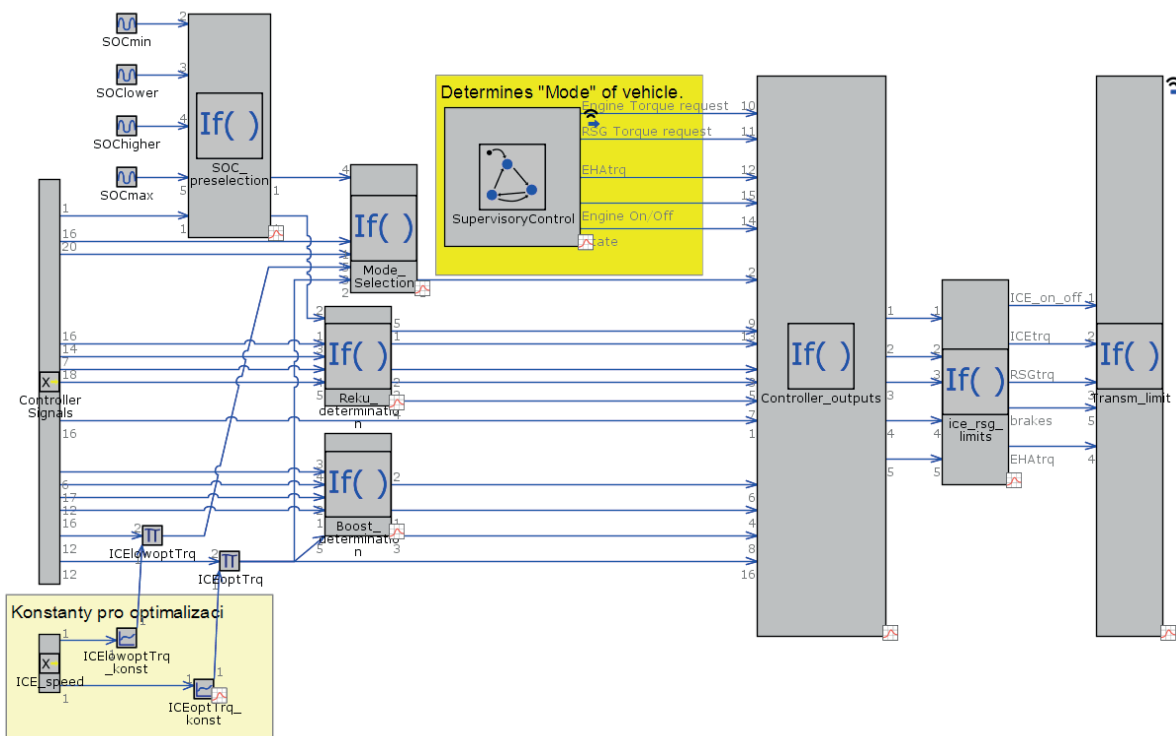
Z porovnání těchto tří variant – s konstantní hodnotou, se skokovým přechodem a s plynulým přechodem vyšlo, že nepatrně lepší je varianta se skokovým přechodem. Rozdíl je však tak malý, že pro další porovnávání ji nemá smysl využívat a využije se místo ní jednodušší varianta s konstantní hodnotou.

5.2 MHEV+ – řídicí strategie (koncept 2)

Rozšířený koncept – MHEV s elektricky poháněnou zadní osou je schopen pracovat v několika dalších módech a zároveň i pro módy použité v předchozím konceptu existuje více možností, jak je aplikovat a jakým způsobem finálně moment na jednotlivé motory přerozdělit. Z tohoto důvodu je strategie rozdělena do většího počtu samostatných bloků.

5.2.1 Řídicí strategie v modelu

Prvním z bloků navíc (Obrázek 34) je „SOC_preselection“. Tento blok na základě aktuální výše SOC posílá výstup o tom, jestli je stav baterie velmi nízký, nízký, normální, vysoký, nebo velmi vysoký. Hranice pro rozdělení do těchto skupin vstupují jako proměnné do optimalizace a na základě těchto skupin mohou být některé módy v daný okamžik zakázány.



OBRÁZEK 34: ŘÍDICÍ STRATEGIE MHEV+

Další bloky „Mode_Selection“, „Reku_determination“ a „Boost_determination“ se starají o výběr aktuálního módu na základě stavu SOC, a aktuálního požadovaného momentu. Důležitým vstupem do těchto bloků jsou hodnoty optimálního momentu z bloků „ICElowoptTrq“ a „ICEoptTrq“. Tyto hodnoty jsou vstupy pro optimalizaci. Na té nižší „ICElowoptTrq“ závisí využití čistě elektrické jízdy a případně nabíjení baterie za jízdy. Na základě „ICEoptTrq“ se rozhoduje využití boostu a rozdělení požadovaného momentu pro jednotlivé motory.

Na základě výstupů těchto vstupů blok „Controller_outputs“ rozdělí požadovaný moment mezi jednotlivé motory. Dalšími výstupy z tohoto bloku je signál o zapnutí/vypnutí spalovacího motoru a v případě brzdění velikost momentu, který musí být zmařen třecími brzdami.

Zbývající tři bloky mají stejnou funkčnost jako v předchozím konceptu.

5.2.2 Optimalizace řídicí strategie

Optimalizace řízení probíhá stejným způsobem jako v předchozím případě. Vstupem jsou proměnné uvedené v tabulce níže (Tabulka 9). Výsledkem optimalizace budou konstantní hodnoty na základě kterých, řídicí strategie rozhoduje o využití jednotlivých módů a o rozdělení momentu. V tomto případě jsou to hodnoty konstant pro výpočet křivky optimálního momentu pro boost při nízkých otáčkách motoru a při vyšších otáčkách motoru („ICEoptTrq_low“ a „ICEoptTrq_high“), hranice pro rozlišení nízkých a vyšších otáček motoru („ICERPM_Thresh“), konstanty pro výpočet hraniční křivky momentu pro čistě elektrickou jízdu a pro nabíjení baterie během jízdy („ICElowoptTrq_low“ a „ICElowoptTrq_high“) a hraniční otáčky pro nízké a vyšší otáčky („ICElowoptRPM_Thresh“). Dalšími hodnotami jsou hodnoty SOC („SOClower“ a „SOChigher“). Na základě těchto hodnot je omezeno užití některých módů. Poslední konstantou je jako v předchozím případě „gearlim“ omezení převodových stupňů, na kterých lze využívat boost.

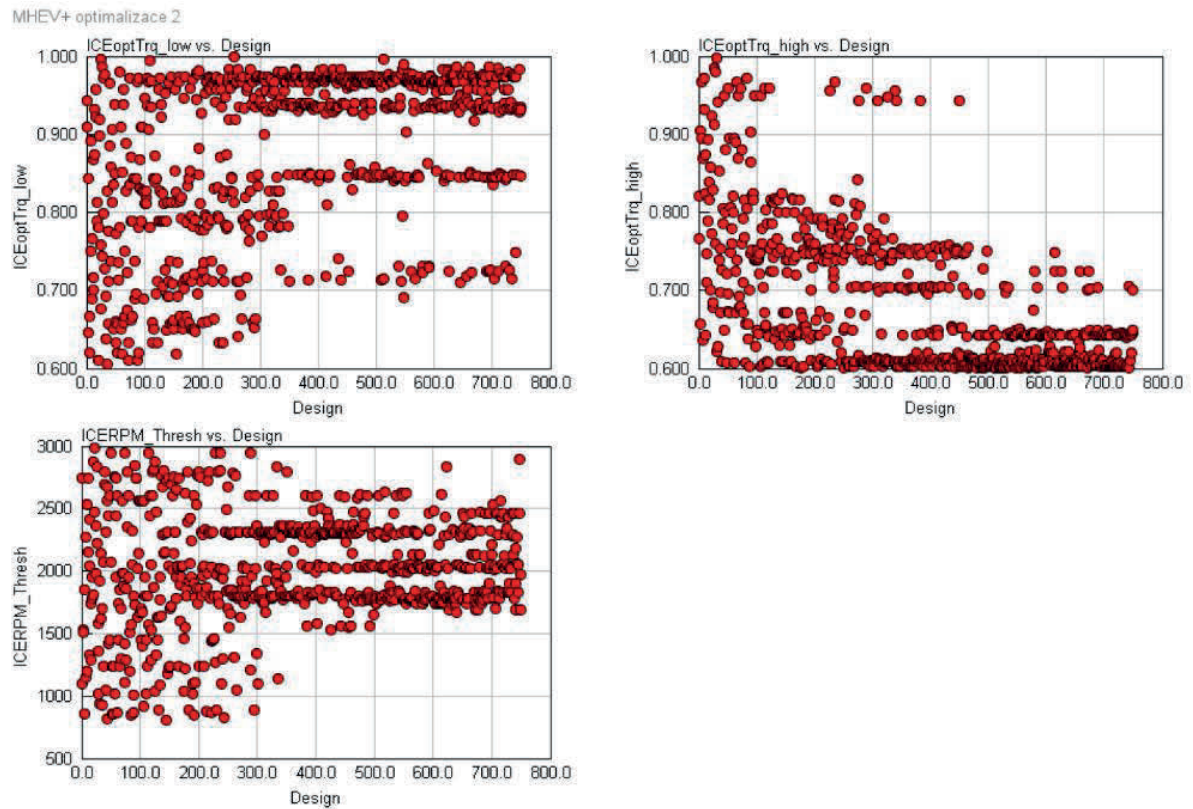
TABULKA 9: OPTIMALIZOVANÉ KONSTANTY – KONCEPT 2

Proměnné	ICEoptTrq_low	ICEoptTrq_high	ICERPM_Thresh	ICElowoptTrq_low	ICElowoptTrq_high	ICElowoptRPM_Thresh	SOClower	SOChigher	gearlim
Spodní limit	0.6	0.6	800	0.2	0.2	800	0.2	0.5	2
Horní limit	1	1	3000	0.6	0.6	3000	0.5	0.8	8
Celá čísla	off	off	off	off	off	off	off	off	on

Cíle optimalizace a omezení jsou stejná jako v předchozím případě.

Průběh optimalizace je pro některé z proměnných vykreslen níže (Obrázek 35). Tato úloha byla velice náročná, a to zejména počtem proměnných. Ve výsledcích lze vidět, že pro některé z proměnných nelze říci, že by opravdu bylo nalezeno jejich optimum, na druhou stranu, některé z proměnných po větším počtu výpočtů k nějaké určité hodnotě zjevně směřují. Na obrázcích níže například limitní otáčky („ICERPM_Thresh“ mezi nižší a vyšší konstantou pro boost („ICEoptTrq_low“ a „ICEoptTrq_high“) jsou zjevně vybírány z užšího intervalu hodnot než na začátku. Podobně se chová také „ICEoptTrq_high“.

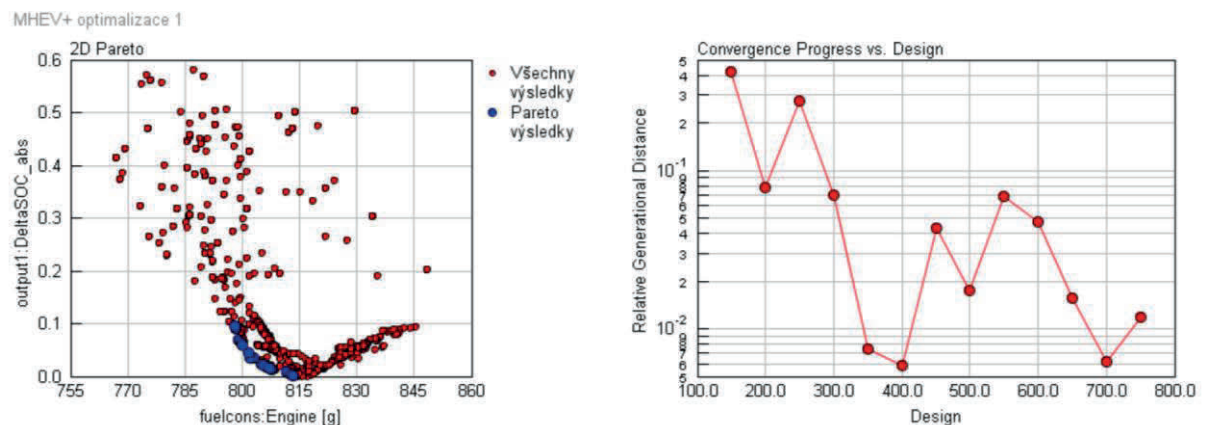
Průběhy chování ostatních proměnných jsou vykresleny v příloze.



OBRÁZEK 35: PRŮBĚH OPTIMALIZACE PRO NĚKTERÉ PROMĚNNÉ

5.2.3 Výsledek optimalizace

Výstupem optimalizace je opět Pareto množina řešení, která nejlépe splnila zadané cíle. Obrázek 36 zobrazuje Pareto množinu a také průběh optimalizace, jak se v jejím průběhu měnila relativní vzdálenost generací.



OBRÁZEK 36: PARETO MNOŽINA VÝSLEDKŮ A KONVERGENCE

TABULKA 10: NEJLEPŠÍ TŘI VÝSLEDKY PRO KONCEPT MHEV+

Číslo výpočtu	Spotřeba paliva [g]	delta SOC [-]	ICEoptTrq_low	ICEoptTrq_high	ICERPM_Thresh	ICElowoptTrq_low	ICElowoptTrq_high	ICElowoptRPM_Thresh	SOClower	SOChigher	gearlim	Přepočtená spotřeba [l/100km]	gCO2/km
748	813	0.00	0.94	0.65	2460	0.28	0.23	2800	0.44	0.76	2	4.70	107.1
720	813	0.00	0.96	0.64	2460	0.27	0.23	2830	0.27	0.57	2	4.69	107.0
656	812	0.01	0.72	0.63	2020	0.27	0.24	1190	0.29	0.71	4	4.69	106.9

Z Pareto množiny byly vybrány tři nejlepší řešení (viz Tabulka 10). Tato řešení nejlépe splnila podmínku nulového rozdílu SOC na začátku a na konci cyklu. A zároveň ze všech ostatních řešení, která tuto podmínku splnila, měly nejmenší možnou spotřebu paliva. Spotřeba v cyklu WLTP je pro tento koncept 4.69 l/100 km (tj. o 0.45 l/100 km méně než pro koncept 1).

6 Porovnání simulace a měření prototypu MHEV+

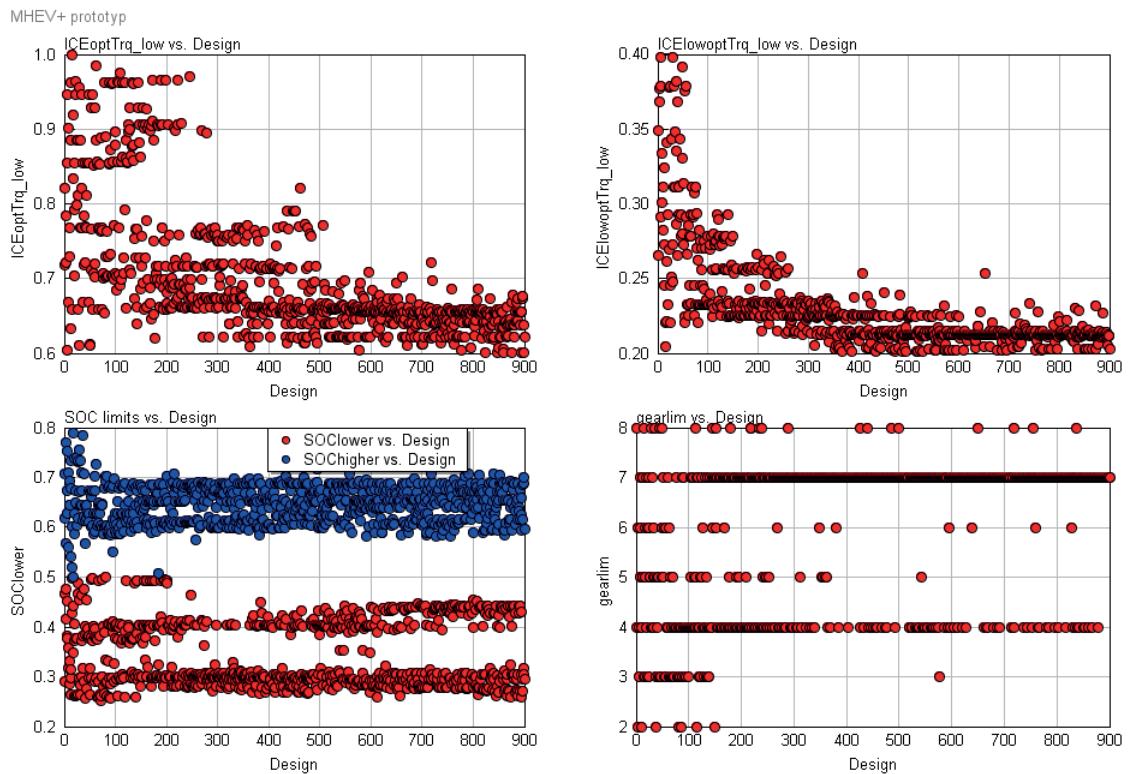
Měření proběhlo pro konkrétní vůz postavený jako prototyp ve ŠKODA AUTO a.s. Je to jiný vůz než ten, na jehož základě byly provedeny předchozí simulace. Vůz se liší v parametrech vozu jako jsou: spalovací motor, převodovka rozměry a vlastnosti kol a parametry karoserie (čelní plocha a součinitel odporu vzduchu). Postup řízení a jeho optimalizace zůstává úplně stejný.

Na základě předchozích výsledků optimalizace řízení byl počet optimalizovaných proměnných zredukován pouze na jednu konstantu pro křivku optimálního momentu pro boost „ICEoptTrq_low“ a na jednu konstantu pro křivku momentu pro posun pracovního bodu a čistě elektrickou jízdu „ICElowoptTrq_low“. Díky tomu není potřeba použít ani limit otáček. A místo původních devíti proměnných lze použít pouze pět proměnných (Tabulka 11) a optimalizace probíhá rychleji.

TABULKA 11: OPTIMALIZOVANÉ KONSTANTY – KONCEPT 2

Proměnné	ICEoptTrq_low	ICElowoptTrq_low	SOClower	SOChigher	gearlim
Spodní limit	0.6	0.2	0.2	0.5	2
Horní limit	1	0.6	0.5	0.8	8
Celá čísla	off	off	off	off	on

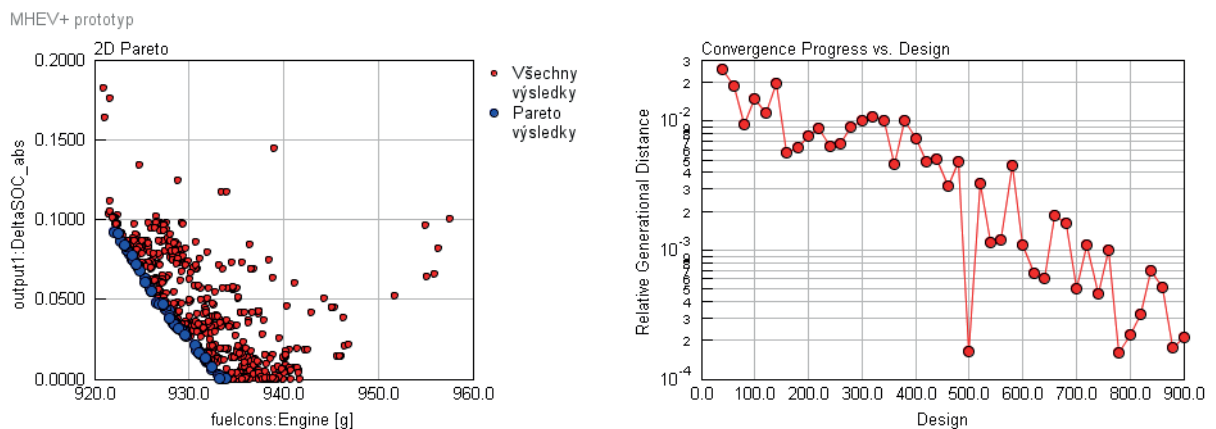
Díky menšímu počtu proměnných optimalizace probíhala rychleji a také její výsledky se jeví po stejném počtu výpočtů lepší. Průběh optimalizace a volby hodnot jsou na obrázku níže (Obrázek 39). Konstanty pro křivku optimálního momentu pro boost i pro čistě elektrickou jízdu míří k optimální hodnotě. Pro boost je optimální hodnota mezi 0.6 a 0.7. Pro čistě elektrickou jízdu je menší než 0.25.



OBRAZEK 37: PRUBĚH OPTIMALIZACE PRO NĚKTERÉ PROMĚNNÉ – PROTOTYP MHEV+

Limity SOC pro spíše vybíjecí nebo nabíjecí režimy směřují pro vybíjecí režimy k hodnotám mezi 0.6 a 0.7. A pro nabíjecí režimy leží kolem hodnot 0.45 nebo 0.3. Boostování by mělo být povoleno pro zařazené stupně nižší než 7.

Na obrázku níže je zobrazena Pareto množina nejlepších výsledků a průběh relativní vzdálenosti generací v závislosti na průběhu výpočtu (Obrázek 38).



OBRAZEK 38: PARETO MNOŽINA VÝSLEDKŮ A KONVERGENCE – PROTOTYP MHEV+

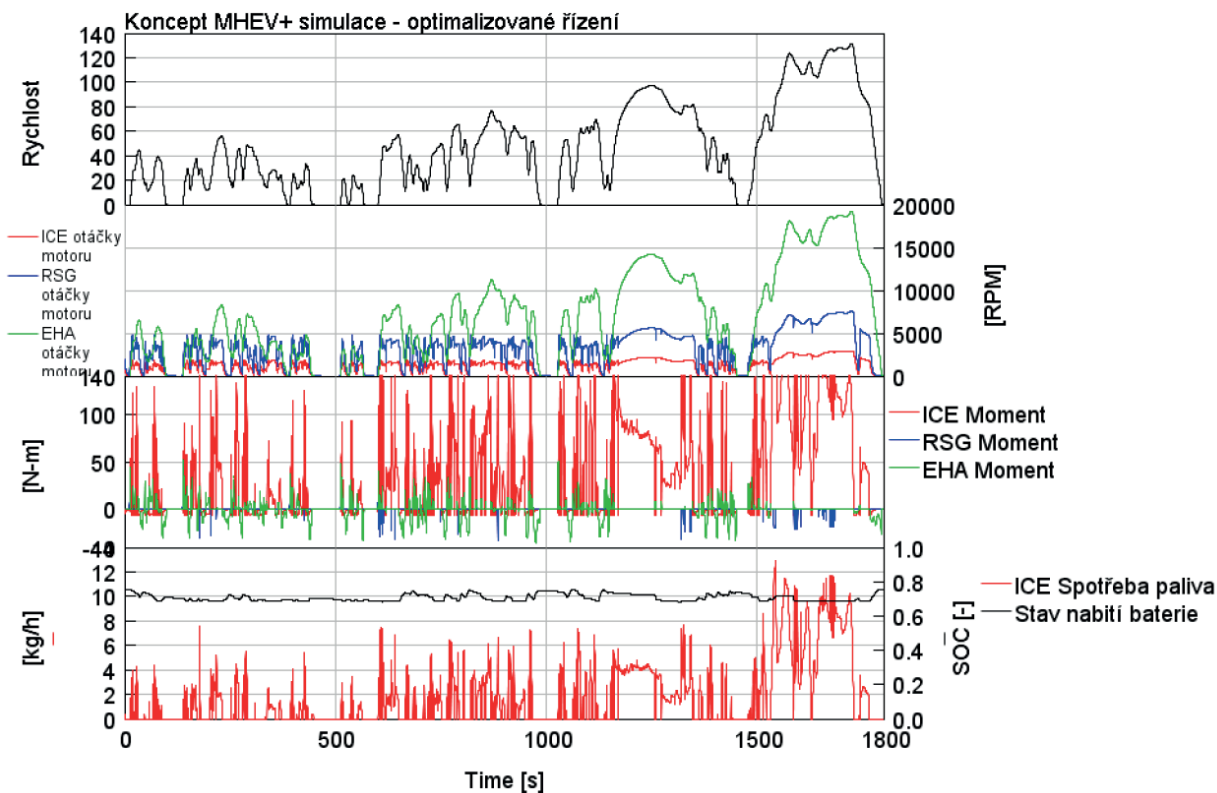
Pro vybraný nejlepší výsledek byla provedena simulace a získána finální spotřeba paliva v l/100 km (viz Tabulka 12).

TABULKA 12: VÝSLEDEK OPTIMALIZACE PRO PROTOTYP MHEV+

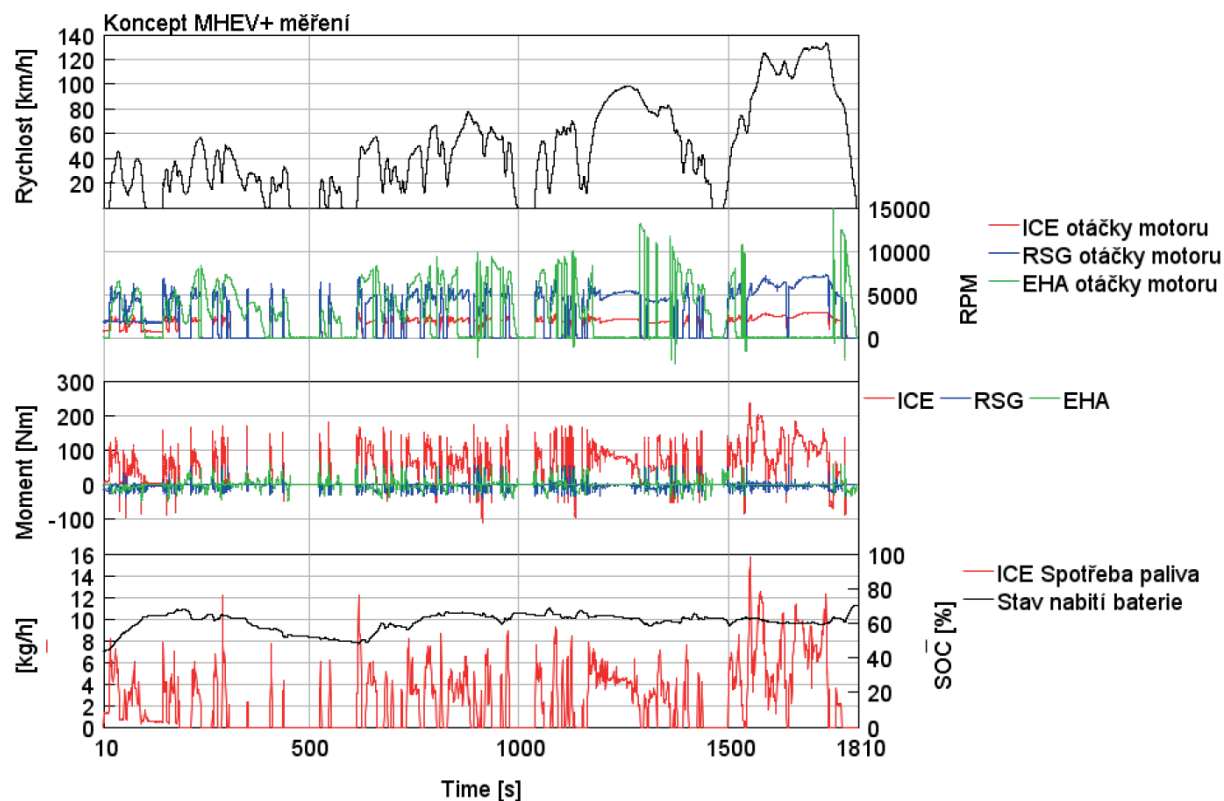
Číslo výpočtu	Spotřeba paliva [g]	delta SOC [-]	ICEoptTrq_low	ICElowoptTrq_low	SOClower	SOChigher	gearlim	Přepočtená spotřeba [l/100km]	gCO2/km
880	933	0.00	0.64	0.21	0.31	0.69	7	5.37	122.51

Výsledky simulace jsou také vykresleny na obrázku níže (Obrázek 39). V prvním grafu je rychlost vozidla, ve druhém otáčky jednotlivých motorů. Červeně jsou vykresleny otáčky spalovacího motoru, modře otáčky RSG (elektromotoru připojenému ke spalovacímu motoru řemenem) a zeleně EHA (elektromotor na zadní nápravě). Třetí graf znázorňuje aktuální moment motorů (barvy zůstávají stejné). Poslední graf znázorňuje pohyb SOC a okamžitou spotřebu paliva. V grafu je vidět například, že většina momentu je dělena pouze mezi spalovací motor a motor na zadní nápravě, který boostuje i rekuperuje. Kvůli omezení otáček elektricky poháněná zadní náprava nemůže být používána ve vysokých rychlostech. V reálném voze dochází k odpojení elektromotoru spojkou, což pro simulaci není potřeba.

Na druhém obrázku (Obrázek 40) jsou v podobném zobrazení vykreslena naměřená data konceptu MHEV+ z válcové zkušebny. Průběhy se v některých okamžicích výrazně liší. Na grafu otáček (druhý v pořadí) je vidět například časté odpojování elektromotoru na zadní nápravě již v nízkých otáčkách. Při detailnějším pohledu si lze u obou zobrazení všimnout vypínání spalovacího motoru již na začátku decelerace (zejména v druhém grafu). Díky tomu, že není spalovací motor zbytečně protáčen a nebrzdí se motorem, může elektricky poháněná zadní náprava rekuperovat více energie.



OBRAZEK 39: VÝSTUP ZE SIMULACE PRO OPTIMALIZOVANÉ ŘÍZENÍ



OBRAZEK 40: VÝSTUP Z MĚŘENÍ

V následující tabulce (Tabulka 13) je provedeno porovnání výsledných hodnot za celý jízdní cyklus WLTP pro měřené hodnoty a simulované hodnoty.

TABULKA 13: POROVNÁNÍ SIMULACE A MĚŘENÍ NA VÁLCOVÉ ZKUŠEBNĚ

Vůz	Spotřeba ve WLTP [l/100 km]	[gCO ₂ /km]
Měřený vůz ze dne 14. 9. 2018 delta SOC = +27 %	6.95	158.37
Optimalizovaný model MHEV+ delta SOC = 0 %	5.38	122.68
Úspora	-	-

Úsporu bohužel není jednoduché vyčíslit, protože vozidlo měřené na válcích za celý cyklus došlo celých 27 % SOC, zatímco strategie simulovaného vozu cílila na nulový rozdíl v SOC před a po cyklu (Tabulka 13).

7 Výsledky

Na základě ověřeného modelu konvenčního vozu byly postaveny modely dvou konceptů hybridních vozů.

Pro jejich řízení byla navržena metoda, v níž bylo pro režim boost potřeba najít konstantní hodnotu pro vynásobení křivky maximálního momentu spalovacího motoru takovou, abych získala křivku, ke které je nejvýhodnější snižovat moment spalovacího motoru a doplňovat ho elektromotorem. Tuto křivku jsem nazvala „ICEoptTrq“. Pokud elektromotor bude spalovacímu motoru asistovat tak, že spalovací motor bude provozován během cyklu WLTP na bodech této křivky, změna stavu nabití baterie za celý cyklus bude nulová a spotřeba za splnění této podmínky minimální.

7.1 Výsledky pro koncept 1

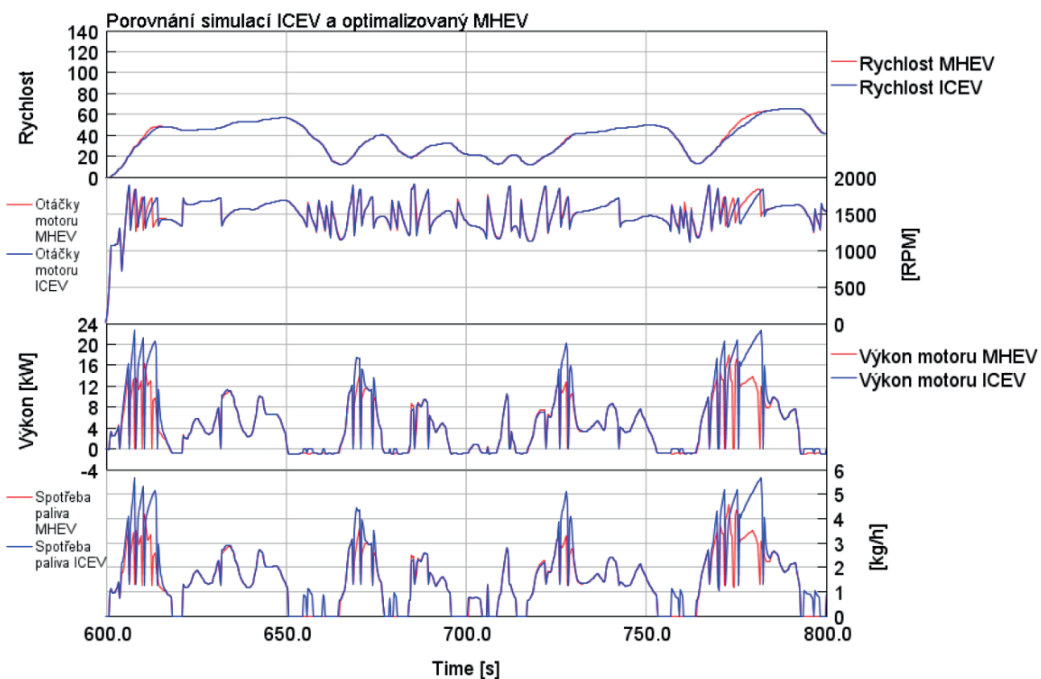
Hybridní vůz s takto optimalizovaným řízením uspoří oproti konvenčnímu vozu 0.4 l/100 km, čemuž podle normy odpovídá 9.17 gCO₂/km (viz Tabulka 14).

TABULKA 14: VÝSLEDNÁ SPOTŘEBA V CYKLU WLTP PRO ICEV A MHEV

Vůz	Spotřeba [l/100 km]	[gCO ₂ /km]
Model ICEV	5.54	126.312
Optimalizovaný model MHEV	5.14	117.15
Úspora	0.40	9.17

Na obrázku (Obrázek 41) je vykresleno projetí části cyklu WLTP pro hybridní a konvenční vůz. V prvním řádku je rychlost vozu, v druhém jsou otáčky motoru, ve třetím je výkon spalovacího motoru a v posledním řádku jsou aktuální spotřeby. Zejména ve vykreslení spotřeby jsou zřejmá místa, kde bylo palivo uspořeno.

Porovnání simulací ICEV a optimalizovaný MHEV

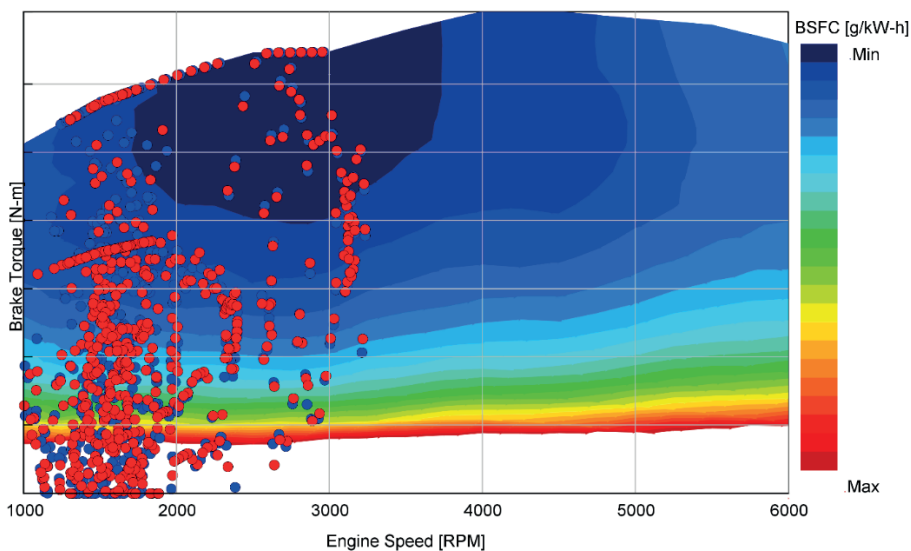


OBRÁZEK 41: JEDEN Z ÚSEKŮ S ÚSPOROU PALIVA BĚHEM BOOSTU

Další porovnání je možné vidět na obrázku níže (Obrázek 42), kde jsou vykreslené pracovní body v úplné charakteristice spalovacího motoru pro simulaci konvenčního vozu (ICEV) a hybridního vozu (MHEV). Modrou barvou jsou vykresleny pracovní body spalovacího motoru původního konvenčního vozu. Červenou barvou jsou znázorněny pracovní body spalovacího motoru v hybridním voze (koncept 1) s optimalizovaným řízením.

Úplná charakteristika spalovacího motoru a pracovní body

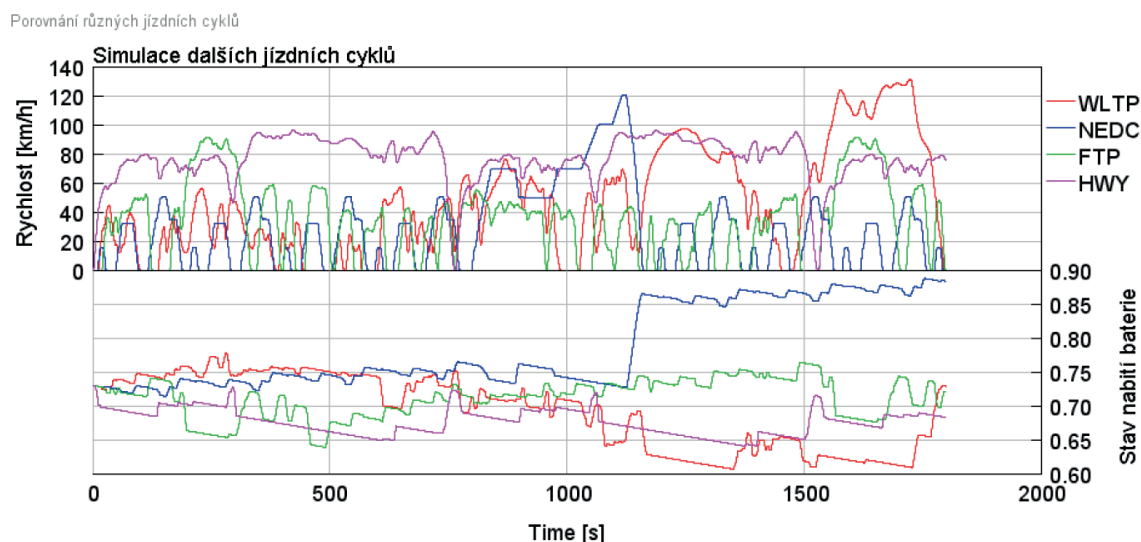
Úplná charakteristika spalovacího motoru a pracovní body
 ● Operating Points ICEV ● Operating Points MHEV



OBRÁZEK 42: PRACOVNÍ BODY VE WLTP PRO ICEV A MHEV⁸

⁸ Osy grafu nejsou popsány z důvodu utajení

Na závěr jsem prověřila schopnost takto řízeného hybridního vozu projet i jiné rychlostní profily než cyklus WLTP. Zvolila jsem jiné ve světě používané jízdní cykly. Řízení pracovalo správně pro všechny vybrané jízdní cykly – WLTP, NEDC, FTP, HWY. Výsledky jsou na obrázku níže (Obrázek 43).



OBRÁZEK 43: SIMULACE DALŠÍCH JÍZDNÍCH CYKLŮ

7.2 Shrnutí – koncept 1

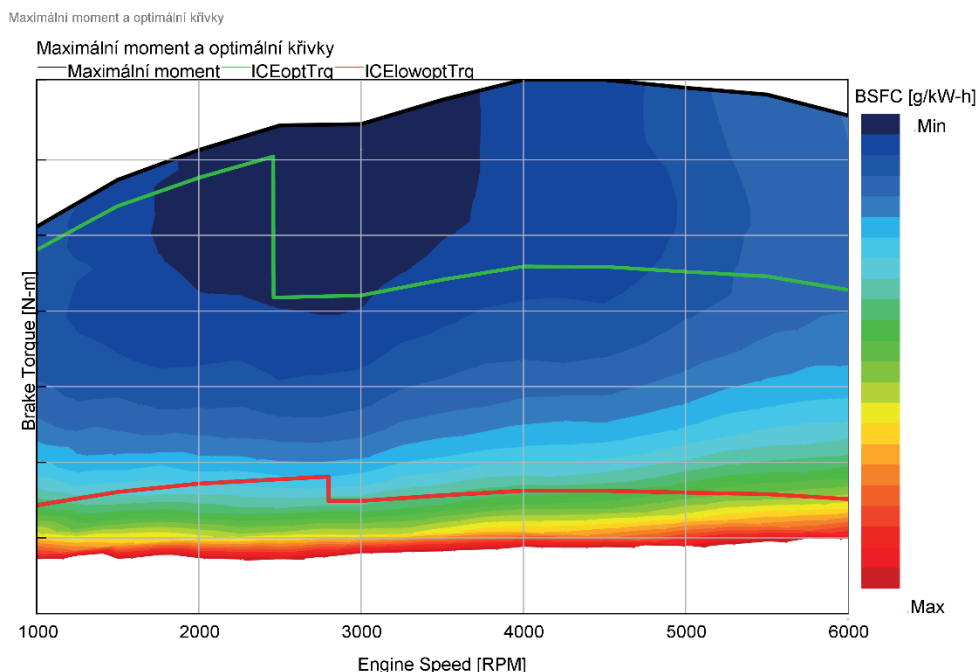
Omezením tohoto konceptu je nemožnost provozu v režimu čistě elektrické jízdy. Druhým omezením je požadavek na projetí cyklu beze změny stavu nabití baterie na konci cyklu. V případě jako je tento, kdy pro vybití baterie je k dispozici pouze režim boostu – asistence elektromotoru spalovacímu motoru při vyšších požadavcích na výkon, musí být v tomto režimu vyčerpáno stejně energie, kolik je získáno při rekuperaci z brzdění. Pro tuto úlohu by proto nebylo výhodné v cyklu využívat nabíjení baterie za jízdy spalovacím motorem, protože získaná energie by nedokázala být využita lépe.

Další nevýhodou zapojení elektromotoru za spalovací motor je to, že elektromotor není schopný rekuperovat energii z brzdění do úplného zastavení. Spalovací motor musí být odpojen před poklesem pod volnoběžné otáčky.

Jednou z teoretických možností využití energie je varianta čistě elektrické jízdy, přičemž v tomto konceptu nelze spalovací motor vypnout a odpojit od elektrického motoru. Za určitých podmínek by i tento koncept mohl být čistě elektrické jízdy schopen, a to v případě, že by spalovací motor byl sice vypnutý, ale protáčel by se a pohon by zajišťoval pouze elektromotor.

7.3 Výsledky pro koncept 2

V dalším kroku byl původní model hybridního vozu MHEV rozšířen o elektricky poháněnou zadní osu a bylo upraveno jeho řízení o několik dalších režimů, jako je například čistě elektrická jízda. Ke strategii řízení jsem přistoupila stejným způsobem. Navrhla jsem křivky optimálního momentu pro boost a v tomto případě i limitní křivku pro čistě elektrickou jízdu. Tato druhá křivka tvoří hranici, pod kterou by spalovací motor neměl být provozován. V grafu úplné charakteristiky je zřejmé, že měrná spotřeba paliva je v těchto místech nejvyšší. Proto právě pro tyto režimy bude využita čistě elektrická jízda. Pro body nad touto křivkou spalovací motor bude zapnutý, ale v ideálním případě bude dobíjet baterii a dostane se tak do oblasti s lepší účinností. Výsledné křivky optimálního momentu jsou vykreslené v obrázku níže (Obrázek 44).



OBRAZEK 44: ÚPLNÁ CHARAKTERISTIKA MOTORU A OPTIMÁLNÍ KŘIVKY PRO MHEV+

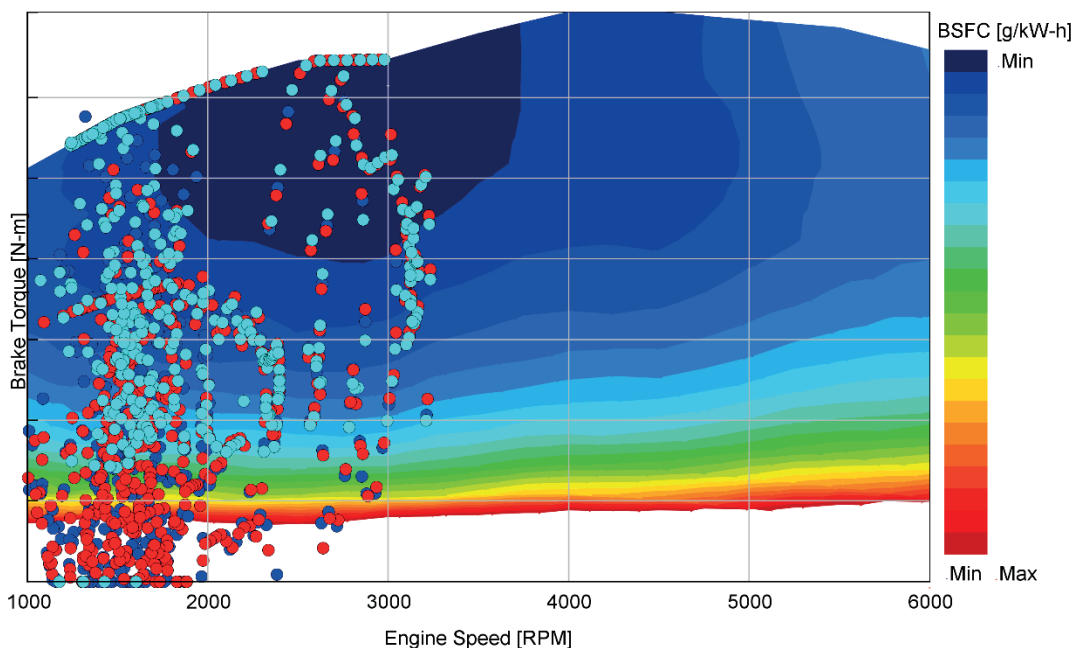
Při zobrazení pracovních bodů všech tří modelů v úplné charakteristice spalovacího motoru (Obrázek 45) je možné vidět, jaké změny řídicí strategie provedla. Například u modelu MHEV byl zřetelně vidět posun pracovních bodů pro boost. Výsledkem optimalizace byla poměrně nízko položená křivka optimálního momentu, proto jí byl ovlivněn velký počet bodů.

Pro MHEV+ mohla strategie využívat režimu čistě elektrické jízdy. Konstanta „ICElowoptTrq“ pro ni je mírně nad 20 % z maximálního momentu (viz odstavec 5.2.3). Proto spalovací motor nebyl v cyklu provozován pod touto křivkou. Tento posun je na obrázku vidět velmi zřetelně.

Úplná charakteristika spalovacího motoru a pracovní body, MHEV+

Úplná charakteristika spalovacího motoru a pracovní body

● Operating Points ICEV ● Operating Points MHEV ● Operating Points MHEV+



OBRÁZEK 45: ÚPLNÁ CHARAKTERISTIKA MOTORU A PRACOVNÍ BODY (ICEV, MHEV, MHEV+)

Naopak křivka optimálního momentu pro boost je velmi blízko maximálnímu momentu a tento posun na grafu není skoro vůbec zřetelný.

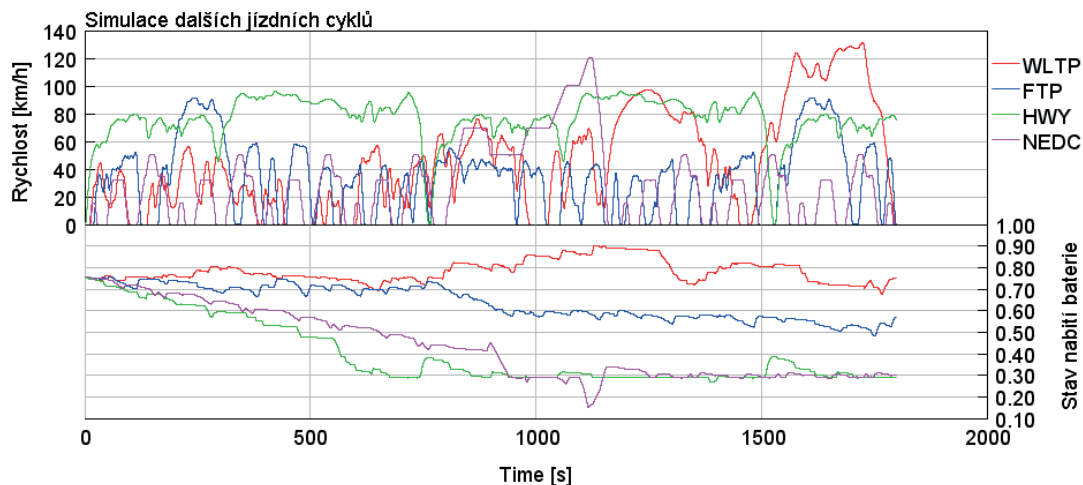
Tabulka 15 obsahuje souhrn výsledku pro tři modely – ICEV, MHEV a MHEV+.

TABULKA 15: VÝSLEDNÁ SPOTŘEBA V CYKLU WLTP PRO ICEV, MHEV A MHEV+

Vůz	Spotřeba [l/100km]	[gCO ₂ /km]
Model ICEV	5.54	126.31
Optimalizovaný model MHEV	5.14	117.15
Optimalizovaný model MHEV+	4,70	107.1
Úspora oproti ICEV	0.84	19.21

Úspora paliva pro koncept MHEV+ řízený navrženou strategií oproti konvenčnímu vozu je až 0.84 l/100 km.

Porovnání různých jízdních cyklů MHEV+



OBRÁZEK 46: SIMULACE DALŠÍCH JÍZDNÍCH CYKLŮ – MHEV+

Z obrázku výše (Obrázek 46) je patrné, že pro většinu simulací různých jízdních cyklů klesá hodnota SOC až ke 30 %.

7.4 Shrnutí – koncept 2

Koncept MHEV+ má oproti konceptu MHEV tu výhodu, že může být poháněn čistě elektricky a spalovací motor může delší dobu zůstat vypnutý. Elektrická osa také dokáže rekuperovat až do úplného zastavení (na rozdíl od elektromotoru zapojeného za spalovací motor).

Zejména díky možnosti čistě elektrické jízdy je MHEV+ schopen dosažení vyšších úspor na spotřebě paliva, v tomto případě oproti konvenčnímu vozu v cyklu WLTP až o 0.84 l/100 km méně.

8 Závěr

Cílem práce „Optimalizace řízení HEV s důrazem na metodiku měření spotřeby paliva WLTP“ bylo navrhnout strategii řízení energetických toků pro koncept hybridního vozu a optimalizovat ji tak, aby hybridní vůz projel jízdní cyklus WLTP s co nejmenší spotřebou a zároveň s vyrovnanou bilancí stavu nabití baterie na začátku a na konci cyklu.

Úvodní kapitoly měly za cíl uvedení do tématu. První část byla věnovaná hybridním pohonům vozidel. Popsala jsem v ní jejich rozvoj, různé definice, užívané komponenty a jejich rozdělení dle různých hledisek. Druhá kapitola se zabývala legislativou a homologací osobních vozidel z hlediska spotřeby a emisí. Kapitola byla věnována především hybridním a elektrickým vozům z pohledu evropské legislativy. Třetí kapitola měla za cíl prozkoumat, jaké přístupy se pro řízení energetických toků ve vozidlech nejčastěji používají. Řízení je pro hybridní vozy tou nesložitější a nejcitlivější částí, mající největší vliv na výsledné výkony, dynamické parametry, spotřeby paliva a množství produkovaných škodlivých látek. V této kapitole jsou popsány režimy provozu a postupy vedoucí k optimálnímu řízení hybridů. Z metod popsaných v této kapitole byla vybrána metoda „rule-based“ a použita pro řízení modelu hybridního vozu v praktické části této práce.

Praktická část začíná ve čtvrté kapitole. Popisuji v ní vybraný software pro práci s modely vozů, stavbu modelu a jednotlivé části modelu. V páté kapitole jsem představila návrh řízení, jeho implementaci do modelu a optimalizaci. Pro řízení hybridního vozu jsem především z důvodu nízké výpočetní náročnosti a jednoduché aplikovatelnosti ve vozidle vybrala řízení založené na sadě pravidel (rule-based). Řízení se skládá ze sady pravidel, podle kterých se řídicí strategie rozhoduje mezi jednotlivými módy. Vstupem do strategie je aktuálně řídicím požadovaný moment k pohonu vozidla. Strategie porovnává tento vstup a další vstupy, jako například aktuální stav baterie, s hranicemi pro jednotlivé módy a dalšími parametry (minimální/maximální dovolený stav baterie, minimální a maximální moment elektromotoru a spalovacího motoru). Důležitou součástí podmínek je pro koncept 1 MHEV hranice pro využití módu boost a pro koncept 2 MHEV+ navíc hranice pro využití čistě elektrické jízdy. Tyto hranice jsou v pravidlech uvedeny jako parametry a jsou vstupem pro optimalizaci.

Hranice pro využití módu boost a čistě elektrické jízdy jsou v obou případech vytvořeny vynásobením křivky maximálního momentu motoru konstantní hodnotou. Pro koncept MHEV jsem vybrala tři způsoby získání hranice pro využití módu boost. Prvním bylo použití jedné konstanty násobící maximální moment motoru pro celý rozsah otáček, druhou možností bylo použití dvou hodnot a jejich skokový přechod a třetí možností bylo využití tří hodnot s plynulými přechody mezi nimi. Výsledky optimalizace ukázaly, že mezi variantami není příliš velký rozdíl. S malým rozdílem byla nejlepší varianta se skokovým přechodem mezi konstantami, kterou

jsem využila pro koncept MHEV+. Úspory využitím tohoto řízení bylo dosaženo, ale optimalizace byla nastavena zbytečně složitě, zanedbání některých konstant by mělo prakticky nulový vliv na úsporu.

Pro optimalizaci řízení prototypu konceptu MHEV+ byla ve výpočtu použita opět jen jedna hodnota pro konstantu pro boost a jedna pro konstantu pro čistě elektrickou jízdu. Ve výsledcích jsou optimální hodnoty zřetelně vidět. Výsledky pro tento konkrétní vůz a porovnání výsledků simulace s měřením vozu na válcové zkušebně je zpracováno v kapitole 6.

V sedmé kapitole jsou shrnuty výsledky výpočtů.

Pro tuto práci jsem navrhla systém řízení konceptu vozu MHEV a MHEV+ a provedla jeho optimalizaci s cílem co největší úspory paliva při projetí jízdního cyklu dle WLTP. Řízením konceptu MHEV bylo díky tomuto systému řízení uspořeno 0,4 litrů paliva na 100 km. Řízením rozšířeného konceptu MHEV+ bylo dosaženo celkové úspory vůči konvenčnímu vozu 0,84 litrů paliva na 100 km a 9.17 gCO₂/km.

Výsledky této práce je možné aplikovat v řídicí jednotce postaveného prototypu.

9 Zdroje

- [1] MI, Chris a Abul MASRUR. *Hybrid electric vehicles: principles and applications with practical perspectives principles and applications with practical perspectives*. Second edition. USA: John Wiley & Sons, 2017. ISBN 9781118970560.
- [2] HOFMANN, Peter. *Hybridfahrzeuge: Ein alternatives Antriebssystem für die Zukunft*. 2. Auflage. Wien: Springer, 2014. ISBN 978-3-7091-1779-8.
- [3] PARAG JOSE, C. a S. MEIKANDASIVAM. A Review on the Trends and Developments in Hybrid Electric Vehicles. *Innovative Design and Development Practices in Aerospace and Automotive Engineering*. Singapore: Springer Singapore, 2017, **2017**, 211-229. Lecture Notes in Mechanical Engineering. DOI: 10.1007/978-981-10-1771-1_25. ISBN 978-981-10-1770-4. Dostupné také z: http://link.springer.com/10.1007/978-981-10-1771-1_25
- [4] Předpis Evropské hospodářské komise OSN (EHK OSN) č. 101 –: Jednotná ustanovení pro schvalování typu osobních automobilů poháněných výhradně spalovacím motorem nebo poháněných hybridním elektrickým hnacím ústrojím z hlediska měření emisí oxidu uhličitého a spotřeby paliva a/nebo měření spotřeby elektrické energie a akčního dosahu na elektřinu, a dále vozidel kategorií M1 a N1 poháněných výhradně elektrickým hnacím ústrojím z hlediska měření spotřeby elektrické energie a akčního dosahu na elektřinu. In: *Úřední věstník Evropské unie*. b.r., ročník 2012, 138/1.
- [5] *Addendum 15: Global technical regulation No. 15: Addendum 15: Global technical regulation No. 15*. In: . Global Registry, 2014, ročník 2014, ECE/TRANS/180/Add.15. Dostupné také z: <https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29r-1998agr-rules/ECE-TRANS-180a15e.pdf>
- [6] LIEBL, Johannes. *Energiemanagement im Kraftfahrzeug: Optimierung von CO2-Emissionen und Verbrauch konventioneller und elektrifizierter Automobile*. 1. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014. ISBN 9783658044510.
- [7] BARTÁK, Petr. *Hybridní pohony v automobilových aplikacích: Doprovodný učební text*. Plzeň: ZČU v Plzni, Fakulta strojní, 2010.
- [8] EHSANI, Mehrdad, Yimin GAO a Ali EMADI. *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2010. Power electronics and applications series. ISBN 978-1-4200-5398-2.

- [9] TSCHÖKE, Helmut. *Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs: Basiswissen*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015. ISBN 978-3-658-04643-9.
- [10] UNECE adopts more accurate fuel efficiency and CO2 test for new cars (WLTP). In: *United Nations Economic Commission for Europe* [online]. Geneva: United Nations Economic Commission for Europe, Information Unit, 2014 [cit. 2019-04-26]. Dostupné z: <http://www.unece.org/index.php?id=35119>
- [11] European countries implement new procedure improving measurement of vehicle fuel consumption and emissions. In: *United Nations Economic Commission for Europe* [online]. Geneva: United Nations Economic Commission for Europe, Information Unit, 2017 [cit. 2019-04-27]. Dostupné z: <http://www.unece.org/?id=46649>
- [12] ANSELMA, Pier Giuseppe, Yi HUO, Joel ROELEVELD, Giovanni BELINGARDI a Ali EMADI. Slope-weighted Energy-based Rapid Control Analysis for Hybrid Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* [online]. b.r., , 1-1 [cit. 2019-05-27]. DOI: 10.1109/TVT.2019.2899360. ISSN 0018-9545. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8642373/>
- [13] REZAEI, Amir, Jeffrey B. BURL, Mohammad REZAEI a Bin ZHOU. Catch Energy Saving Opportunity in Charge-Depletion Mode, a Real-Time Controller for Plug-In Hybrid Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* [online]. 2018, **67**(11), 11234-11237 [cit. 2019-04-27]. DOI: 10.1109/TVT.2018.2866569. ISSN 0018-9545. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8447295/>
- [14] GONG, Qiuming, Yaoyu LI a Zhongren PENG. Power management of plug-in hybrid electric vehicles using neural network based trip modeling. *2009 American Control Conference*. IEEE, 2009, , 4601-4606. DOI: 10.1109/ACC.2009.5160623. ISBN 978-1-4244-4523-3. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5160623/>
- [15] LI, Cheng, Zhongwen ZHU, Qing WEI, Jinfeng GONG, Xu WANG a Denggao HUANG. Research on Multi Parameter Logic Threshold Drive Control Strategy for Distributed Hybrid Electric Vehicle. In: *2018 IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)* [online]. IEEE, 2018, s. 226-230 [cit. 2019-04-27]. DOI: 10.1109/IAEAC.2018.8577854. ISBN 978-1-5386-4509-3. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8577854/>
- [16] FUSHUN ZHU, HONGWEN HE YI LIN a GUOFEI LI. Study on Fuzzy Logic Control Strategy of ISG hybrid system. In: *2010 International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering* [online]. IEEE, 2010, s. - [cit. 2019-04-

27]. DOI: 10.1109/CMCE.2010.5610088. ISBN 978-1-4244-7957-3. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5610088/>

[17] REN, Yali a Zhen WU. Research on the Energy Management Strategy of Hybrid Vehicle Based on Pontryagin's Minimum Principle. In: *2018 10th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC)* [online]. IEEE, 2018, s. 356-361 [cit. 2019-04-27]. DOI: 10.1109/IHMSC.2018.10187. ISBN 978-1-5386-5836-9. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8530248/>

[18] CHENG, Yu-Huei, Ching-Ming LAI a Jiashen TEH. Application of Particle Swarm Optimization to Design Control Strategy Parameters of Parallel Hybrid Electric Vehicle with Fuel Economy and Low Emission. In: *2018 International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C)* [online]. IEEE, 2018, s. 342-345 [cit. 2019-04-27]. DOI: 10.1109/IS3C.2018.00093. ISBN 978-1-5386-7036-1. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8645033/>

[19] *GT-SUITE* [online]. Gamma Technologies, 2015-2019 [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: <https://www.gtisoft.com/>

Seznam obrázků

Obrázek 1: Spalovací motor – úplná charakteristika	13
Obrázek 2: Elektromotor – mapa účinnosti [6]	14
Obrázek 3: Sériový hybrid [9].....	19
Obrázek 4: Paralelní hybrid [9].....	20
Obrázek 5: Sério-paralelní hybrid [9].....	21
Obrázek 6: Hybrid s rozdílným pohonem náprav [9].....	22
Obrázek 7: Průběh rychlosti WLTC.....	23
Obrázek 8: Průběh testu pro OVC-HEV [5].....	25
Obrázek 9: Průběh testu pro NOVC-HEV [5].....	25
Obrázek 10: Schéma logických hranic pro jednotlivé režimy [15]	29
Obrázek 11: Příklad vstupy a výstup – fuzzy logic [16].....	30
Obrázek 12: Model MHEV v GT Suite.....	34
Obrázek 13: Spalovací motor.....	35
Obrázek 14: Elektromotor	35
Obrázek 15: Baterie	36
Obrázek 16: Převodovka – koncept 1	36
Obrázek 17: Převodovka – koncept 2	37
Obrázek 18: Vozidlo – koncept 1	37
Obrázek 19: Vozidlo s elektrickou zadní nápravou – koncept 2.....	38
Obrázek 20: Řízení baterie	39
Obrázek 21: Řízení spalovacího motoru	39
Obrázek 22: Řízení brzd	40
Obrázek 23: Řidič	41
Obrázek 24: Průběh výpočtu.....	42
Obrázek 25: Běžné zobrazení dat.....	43
Obrázek 26: Porovnání simulací konvenčního vozu.....	44
Obrázek 27: Úplná charakteristika spalovacího motoru a pracovní body ve WLTP	45
Obrázek 28: Řídící strategie MHEV	47
Obrázek 29: Maximální moment motoru a optimální křivky	51
Obrázek 30: Průběh optimalizace – proměnné	52
Obrázek 31: Průběh optimalizace – proměnná „gearlimit“	53
Obrázek 32: Pareto množina výsledků.....	54
Obrázek 33: Průběh optimalizace – konvergence	55
Obrázek 34: Řídící strategie MHEV+	56
Obrázek 35: Průběh optimalizace pro některé proměnné.....	58

Obrázek 36: Pareto množina výsledků a konvergence.....	58
Obrázek 37: Průběh optimalizace pro některé proměnné – prototyp MHEV+.....	61
Obrázek 38: Pareto množina výsledků a konvergence– prototyp MHEV+.....	61
Obrázek 39: Výstup ze simulace pro optimalizované řízení	63
Obrázek 40: Výstup z měření.....	63
Obrázek 41: Jeden z úseků s úsporou paliva během boostu	66
Obrázek 42: Pracovní body ve WLTP pro ICEV a MHEV	66
Obrázek 43: Simulace dalších jízdních cyklů	67
Obrázek 44: Úplná charakteristika motoru a optimální křivky pro MHEV+	68
Obrázek 45: Úplná charakteristika motoru a pracovní body (ICEV, MHEV, MHEV+)	69
Obrázek 46: Simulace dalších jízdních cyklů – MHEV+	70

Seznam tabulek

Tabulka 1: Režimy provozu hybridního vozidla [8]	26
Tabulka 2: Porovnání výsledků simulace konvenčního vozu	43
Tabulka 3: Tabulka módů.....	48
Tabulka 4: Tabulka výstupů pro jednotlivé módy.....	50
Tabulka 5: Optimalizované konstanty.....	51
Tabulka 6: Cíle optimalizace	52
Tabulka 7: Omezení pro optimalizaci	52
Tabulka 8: Výsledky pro tři varianty optimalizace MHEV	55
Tabulka 9: Optimalizované konstanty – koncept 2	57
Tabulka 10: Nejlepší tři výsledky pro koncept MHEV+	59
Tabulka 11: Optimalizované konstanty – koncept 2	60
Tabulka 12: Výsledek optimalizace pro prototyp MHEV+	62
Tabulka 13: Porovnání simulace a měření na válcové zkušebně	64
Tabulka 14: Výsledná spotřeba v cyklu WLTP pro ICEV a MHEV.....	65
Tabulka 15: Výsledná spotřeba v cyklu WLTP pro ICEV, MHEV a MHEV+.....	69

Seznam příloh

Příloha 1. – Výsledky optimalizace konceptu MHEV+