

**UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA**

**OPTIMALIZACE ŘÍZENÍ SPALOVACÍHO MOTORU
V HYBRIDNÍM POHONU VOZIDLA**

DIZERTAČNÍ PRÁCE

2012

Ing. Zdeněk Mašek

UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

**KATEDRA ELEKTROTECHNIKY, ELEKTRONIKY
A ZABEZPEČOVACÍ TECHNIKY V DOPRAVĚ**

**OPTIMALIZACE ŘÍZENÍ SPALOVACÍHO MOTORU
V HYBRIDNÍM POHONU VOZIDLA**

DIZERTAČNÍ PRÁCE

AUTOR: Ing. Zdeněk Mašek

ŠKOLITEL: Doc. Ing. Stanislav Gregora, Ph.D.

2012

UNIVERSITY OF PARDUBICE
JAN PERNER TRANSPORT FACULTY

**DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING
AND SIGNALLING IN TRANSPORT**

**CONTROL STRATEGY OPTIMIZATION
OF COMBUSTION ENGINE IN HYBRID ELECTRIC
VEHICLE**

DISSERTATION

AUTHOR: Ing. Zdeněk Mašek

SUPERVISOR: Doc. Ing. Stanislav Gregora, Ph.D.

2012

Prohlášení

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 6. ledna 2012

Ing. Zdeněk Mašek

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat svému školiteli, panu Doc. Ing. Stanislavovi Gregorovi, PhD., za jeho vedení během mého doktorského studia a za rady, cenné podněty a připomínky, které mi pomohly při zpracování této práce. Velký dík patří panu Prof. Ing. Jaroslavu Novákovi, CSc., který mi vždy s nevídanou ochotou poradil a bez něhož by tato práce nemohla nikdy vzniknout. Dále bych chtěl poděkovat své rodině, která mi vytvořila potřebné zázemí při tvorbě této práce a při studiu jako takovém.

V Pardubicích dne 6. ledna 2012

Ing. Zdeněk Mašek

ANOTACE

Tato dizertační práce je zaměřena na návrh metodiky optimálního řízení vznětového spalovacího motoru použitého jako primární zdroj v hybridním pohonu vozidla. V práci je provedena rozsáhlá analýza chodu spalovacího motoru za účelem dosažení co nejnižší spotřeby paliva. Je porovnána metoda statické optimalizace vycházející z úplné charakteristiky spalovacího motoru s optimalizací dynamickou, která bere ohled na konkrétní jízdní cyklus a na požadavky vycházející z praktické implementace algoritmu na vozidle. Analýzy jsou založeny na simulacích provedených na vytvořeném modelu spalovacího motoru zatěžovaného el. generátorem typu PMSG. Práce si neklade za cíl vytvořit systém řízení hybridního pohonu jako celku, zabývá pouze řízením spalovacího motoru, který je zatěžován el. generátorem.

KLÍČOVÁ SLOVA

Hybridní vozidlo, hybridní pohon, spalovací motor, vznětový motor, spotřeba paliva, emise, generátor, PMSG, vektorové řízení, optimalizace, strategie řízení, zatěžovací charakteristika, optimální trajektorie

ABSTRACT

A main goal of dissertation is to propose a methodology for optimal control of diesel engine in hybrid vehicle drivetrain. An extensive analysis of combustion engine operation in order to achieve the lowest fuel consumption are done. Two optimization methods are compared. The first one is based on static fuel consumption map of engine, the second one is such optimization that keep in mind engine dynamic operation during a road cycle and accounts for implementation in real control system. Analysis are based on simulations. Models of combustion engine, synchronous permanent magnet generator and inverter are created for this purpose. Thesis doesn't deal with control strategy of the whole hybrid drivetrain, it deals only with control of combustion engine which is loaded with electric generator.

KEYWORDS

Hybrid vehicle, hybrid drivetrain, combustion engine, diesel engine, fuel consumption, emissions, generator, PMSG, vector control, optimization, control strategy, load curve, optimal trajectory

OBSAH

1. CÍL PRÁCE.....	9
1.1 STRUKTURA PRÁCE.....	10
2. SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY	11
2.1 ZÁKLADNÍ KONCEPT HYBRIDNÍHO POHONU.....	11
2.2 VARIANTY HYBRIDNÍCH POHONŮ	11
2.2.1 Sériový hybridní pohon	12
2.2.2 Paralelní hybridní pohon.....	12
2.3 STRATEGIE ŘÍZENÍ HYBRIDNÍCH POHONŮ	13
2.4 APLIKACE HYBRIDNÍHO POHONU NA AUTOBUSECH	15
2.4.1 Orion VII hybrid bus	16
2.4.2 Solaris Urbino hybrid	17
2.4.3 Mercedes Citaro BlueTec Hybrid.....	18
2.4.4 Volvo 7700 Hybrid.....	18
2.4.5 Škoda H 12	19
2.5 VZNĚTOVÝ SPALOVACÍ MOTOR.....	19
2.5.1 Vlastnosti a funkce moderního vznětového SM.....	19
2.5.2 Produkce emisí vznětového motoru.....	20
2.5.3 Základní parametry spalovacího motoru	23
2.5.4 Simulační modely SM	28
2.6 ELEKTRICKÝ GENERÁTOR A USMĚRŇOVAČ	33
2.6.1 Synchronní stroj s permanentními magnety	33
2.6.2 Pulzní usměrňovač.....	34
2.6.3 Regulace soustavy PMSG - pulzní usměrňovač	36
3. ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ.....	40
3.1 OPTIMÁLNÍ ŘÍZENÍ SM.....	40
3.1.1 Úplná charakteristika SM	41
3.1.2 Optimální zatěžovací charakteristika.....	42
3.1.3 Schodovitá optimální trajektorie.....	43
3.1.4 Použitý způsob optimalizace	46
3.2 SIMULAČNÍ SOFTWARE.....	47
3.3 MODEL SM	47
3.3.1 Výpočet kroutícího momentu	52
3.3.2 Blok výpočtu momentu a otáček motoru	54
3.3.3 Motorová brzda.....	57
3.3.4 Extrapolovaná palivová mapa.....	58
3.3.5 Produkce emisí a spotřeba paliva.....	60
3.3.6 Souhrn vlastností modelu SM.....	64
3.4 MODEL OPTIMALIZAČNÍ JEDNOTKY ŘÍZENÍ SPALOVACÍHO MOTORU.....	65

3.4.1	Způsob práce se SM.....	67
3.4.2	Výpočet dostupného výkonu SM v motorovém režimu	68
3.4.3	Výpočet dostupného výkonu SM v brzděném režimu.....	69
3.4.4	Rezerva na dynamický výkon.....	69
3.4.5	Rezerva maximálního výkonu	71
3.4.6	Souhrn vlastností modelu optimalizační jednotky řízení SM	72
3.5	MODEL ALTERNÁTORU	73
3.5.1	Model PMSG	73
3.5.2	Modely dalších bloků regulační struktury momentu a pulzního usměrňovače	75
3.5.3	Simulace	77
3.6	MODEL SOUSTROJÍ SM + ALTERNÁTOR.....	77
3.6.1	Optimální zatěžovací charakteristika celého soustrojí.....	78
4.	PROVÁDĚNÉ ANALÝZY A ZPŮSOB PROVEDENÍ SIMULACÍ.....	80
4.1	PROVÁDĚNÉ ANALÝZY	80
4.2	ZPŮSOB PROVEDENÍ SIMULACÍ	80
4.2.1	Odběr pomocných spotřebičů.....	82
4.2.2	Sledované veličiny.....	82
4.2.3	Jízdní cykly.....	83
5.	SIMULACE CHODU SAMOTNÉHO SPALOVACÍHO MOTORU	88
5.1	SIMULAČNÍ MODEL	89
5.1.1	Popis simulačního modelu.....	90
5.1.2	Startování SM	91
5.2	SCÉNÁŘ Č. 1 - SPOTŘEBA PALIVA V JEDNOM JÍZDNÍM CYKLU U RŮZNÝCH TRAJEKTORIÍ.....	92
5.2.1	Výsledky simulací	93
5.2.2	Grafické výstupy ze simulací.....	99
5.3	SCÉNÁŘ Č. 2 – TRAJEKTORIE OPTIMALIZOVANÉ PRO RŮZNÉ JÍZDNÍ CYKLY	105
5.3.1	Použité trajektorie.....	105
5.3.2	Výsledky simulací	107
5.4	SCÉNÁŘ Č. 3 – VLIV VELIKOSTI HYSTEREZE VÝKONU U SCHODOVITÉ TRAJEKTORIE.....	113
5.4.1	Výsledky simulací	114
5.5	SCÉNÁŘ Č. 4 – VLIV OMEZENÍ STRMOSTI ŽÁDANÉ HODNOTY OTÁČEK.....	118
5.5.1	Výsledky simulací	119
5.6	SCÉNÁŘ Č. 5 – SPALOVACÍ MOTOR V REŽIMU STOP AND GO	121
5.6.1	Výsledky simulací	122
6.	SIMULACE CHODU CELÉHO SOUSTROJÍ	124
6.1	SIMULAČNÍ MODEL CELÉHO SOUSTROJÍ	125
6.1.1	Popis simulačního modelu.....	126
6.2	SCÉNÁŘ Č. 6 – POROVNÁNÍ CHODU CELÉHO SOUSTROJÍ VŮČI SAMOTNÉMU SM	126

6.2.1	Použité trajektorie.....	127
6.2.2	Výsledky simulací	128
6.2.3	Grafické výstupy ze simulací.....	132
7.	SOUHRN DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ	138
8.	ZÁVĚR	139
	POUŽITÉ ZKRATKY	141
	ZNAČENÍ VELIČIN	143
	SEZNAM OBRÁZKŮ	147
	SEZNAM TABULEK	153
	LITERATURA	154
	SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA	159

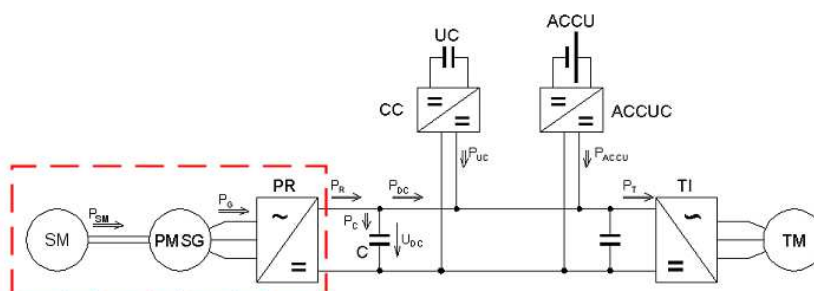
1. CÍL PRÁCE

Vývoj hybridních vozidel nabývá v posledních letech na intenzitě. Téměř každá automobilka dnes nabízí vozidlo s hybridním pohonem. Hybridní vozidla jsou často označována jako mezi krok mezi konvenčními vozidly a elektromobily. Plošnému rozšíření elektromobilů brání především stále omezený dojezd a nevyvinutá infrastruktura dobíjecích přípojek, v neposlední řadě také cena. Hybridní vozidla kombinují výhody dlouhého dojezdu konvenčních vozidel a ekologického provozu elektromobilů, ovšem za cenu velké složitosti a ekonomické náročnosti systému. Výhodou hybridního vozidla vůči konvenčnímu je možnost optimalizace provozu primárního zdroje a obecně výkonových toků uvnitř vozidla, což se projevuje snížením spotřeby paliva a také nižší produkcí emisí. V závislosti na typu hybridního pohonu je umožněn i úplně bezemisní provoz v omezeném dojezdu, což je výhodné např. v centrech měst, do kterých je zakázán vjezd vozidel s konvenčním pohonem. Hybridní pohon je nasazován nejen u osobních vozidel, ale velmi často také u autobusů. Především u autobusů městské hromadné dopravy je velký potenciál pro dosažení úspor vzhledem k jejich zastávkovitému charakteru provozu.

Cílem této práce je nalezení metodiky optimalizace provozu primární zdrojové soustavy hybridního pohonu s ohledem na minimalizaci spotřeby paliva. V práci je provedena rozsáhlá analýza chodu spalovacího motoru za účelem dosažení co nejnižší spotřeby paliva.

Při provádění všech analýz byla uvažována primární zdrojová soustava sériového hybridního pohonu, která je tvořena vznětovým spalovacím motorem s připojeným elektrickým generátorem s permanentními magnety a pulzním usměrňovačem.

Práce si neklade za cíl vytvořit systém řízení hybridního pohonu jako celku, zabývá pouze řízením spalovacího motoru, který je zatěžován el. generátorem (Obr. 1.1, orámováno).



Obr. 1.1 Struktura sériového hybridního pohonu

Je porovnávána metoda statické optimalizace vycházející z úplné charakteristiky spalovacího motoru s optimalizací dynamickou, která bere ohled na konkrétní jízdní cyklus a na požadavky vycházející z praktické implementace algoritmu na vozidle. Je analyzován vliv el. generátoru na optimální provoz spalovacího motoru.

Analýzy jsou založeny na simulacích provedených na vytvořeném modelu v prostředí Matlab/Simulink.

Některé výsledky této práce byly použity při vývoji nového hybridního autobusu firmy Škoda Electric a.s. Poznatky se uplatní i při řešení systému řízení pohonu s hydrostatickým přenosem výkonu kolejového vozidla z produkce firmy CZ Loko a.s.

Univerzita Pardubice Dopravní fakulta Jana Pernera	Dizertační práce	10
---	------------------	----

1.1 STRUKTURA PRÁCE

Práce je rozdělena do 8 kapitol:

1. Cíl práce
2. Současný stav problematiky
3. Zvolené metody zpracování
4. Prováděné analýzy a způsob provedení simulací
5. Simulace chodu samotného spalovacího motoru
6. Simulace chodu celého soustrojí
7. Souhrn dosažených výsledků
8. Závěr

V kapitole 1 jsou vytyčeny cíle této dizertační práce.

Kapitola 2 obsahuje přehled systému hybridních pohonů a jejich řízení, ukázky hybridních autobusů, teorii spalovacích motorů, synchronního generátoru s permanentními magnety a pulzního usměrňovače.

Kapitola 3 je jádrem této práce. Je zde navržen způsob optimálního řízení spalovacího motoru a vysvětlen způsob optimalizace. Dále jsou zde popsány vytvořené modely spalovacího motoru, el. generátoru, pulzního usměrňovače a optimalizační jednotky spalovacího motoru se zohledněním budoucího zařazení modelu do systému nadřazeného systému řízení hybridního pohonu.

V kapitole 4 je uveden seznam prováděných analýz a vysvětlen způsob provedení simulací.

V kapitolách 5 a 6 jsou uvedeny výsledky simulací z různých simulačních scénářů včetně jejich detailního popisu.

V kapitole 7 jsou shrnuty a diskutovány dosažené výsledky s ohledem na vyslovené předpoklady.

Kapitola 8 je závěr, ve kterém jsou uvedeny nejdůležitější závěry a je navrhnut směr dalšího výzkumu.

2. SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

2.1 ZÁKLADNÍ KONCEPT HYBRIDNÍHO POHONU

Hybridní pohon je obecně takový pohon, ve kterém jsou použity dva nebo více zdrojů energie. V praxi se nejvíce uplatnila kombinace spalovacího motoru a elektrochemických článků (akumulátorů). Označení „hybridní pohon“ v moderním pojetí předpokládá co nejefektivnější řízení celého pohonu s možností rekuperace energie při brzdění vozidla.

Ve vozidlech s konvenčním pohonem pracuje spalovací motor (SM) v pracovních bodech, které musí odpovídat aktuálnímu požadavku na trakční výkon, přičemž motor nepracuje vždy v optimálních pracovních bodech, ať už s ohledem na spotřebu paliva nebo produkci emisí. Spalovací motor je dimenzován na svůj maximální výkon, ten ovšem nebývá v reálném provozu po většinu doby využit, takže motor pracuje s horší průměrnou účinností.

Myšlenkou hybridního pohonu je, v závislosti na konfiguraci hybridního pohonu, umožnit více či méně nezávislý provoz spalovacího motoru bez ohledu na rychlost vozidla a žádaný trakční výkon, aby spalovací motor pracoval po většinu času v optimálních pracovních bodech. A dále umožnit rekuperaci energie při brzdění vozidla.

Typů pohonných řetězců, které splňují výše uvedené požadavky, může být velké množství, přičemž se prakticky používají dvě základní varianty – sériový hybridní pohon a paralelní hybridní pohon a z nich odvozené typy. Primárním zdrojem energie může být zážehový nebo vznětový spalovací motor nebo např. palivový článek. Jako akumulátory energie a zdroje pro krytí špičkového výkonu lze použít elektrochemické články (akumulátor), zdroje elektrostatické (superkapacitor) nebo elektromechanické (setrvačnické). Elektrické stroje mohou být také různého typu, přičemž dnes se výhradně používají střídavé asynchronní motory a nově také synchronní stroje s permanentními magnety díky výhodnému poměru výkon/hmotnost.

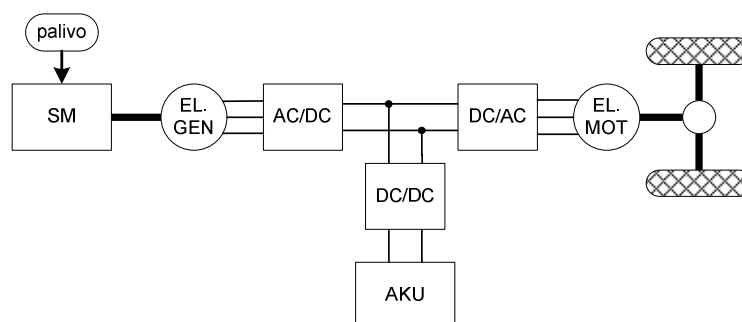
Velmi důležité je správné dimenzování všech komponent hybridního pohonu. Spalovací motor nesmí být předdimenzován, aby nepracoval s nízkou účinností. Příliš velké a těžké akumulátory zvýší hmotnost a cenu vozidla. Poddimenzované elektromotory nezaručí požadované výkonnostní charakteristiky vozidla. V neposlední řadě je důležitá strategie řízení celého hybridního pohonu, která musí správně rozdělovat energetické toky na jednotlivé komponenty hybridního pohonu s ohledem na požadovaný výkon a stav nabití akumulátorů.

2.2 VARIANTY HYBRIDNÍCH POHONŮ

Existuje velké množství variant (topologií) hybridních pohonů, které se mezi sebou liší ve vazbách mezi všemi komponenty pohonu (primární zdroj, akumulátor, elektrický motor/generátor, spojka, převodovka apod.). Lze říci, že všechny tyto varianty jsou odvozeny ze dvou základních topologií: sériová a paralelní. Každá z nich má své výhody a nevýhody a volba dané topologie závisí na typu vozidla a způsobu jeho provozu.

2.2.1 SÉRIOVÝ HYBRIDNÍ POHON

Tato topologie je typická tím, že neexistuje přímá mechanická vazba mezi primárním zdrojem (uvažujeme spalovací motor) a koly. Pracovní bod SM lze volit libovolně, což je velká výhoda. Nevýhodou je snížená účinnost přenosu energie vůči paralelní topologii, protože dochází ke dvojnásobné konverzi energie ve směru SM → kola vozidla. Energie dodaná spalovacím motorem je přeměněna na el. energii prostřednictvím el. generátoru na hřídeli SM, částí této el. energie mohou být dobíjeny akumulátory, část je použita pro napájení elektromotoru, který el. energii přeměňuje na mechanickou pro pohon vozidla.



Obr. 2.1 Sériový hybridní pohon

Výhody:

- Mechanické oddělení SM od kol vozidla – SM může být vždy provozován v optimálním pracovním bodě.
- Odpadá složitá vícestupňová převodovka – postačuje nápravový diferenciál, díky výhodné trakční charakteristice elektromotoru. Lze použít i individuální pohon kol.
- Vozidlo může být poháněno pouze elektricky, SM může být úplně vypnut.
- Elektromotor může být ve vozidle zabudován nezávisle na umístění SM. To umožňuje optimalizaci rozložení hmotnosti vozidla a u autobusů umožňuje plné nízkopodlažní provedení.

Nevýhody:

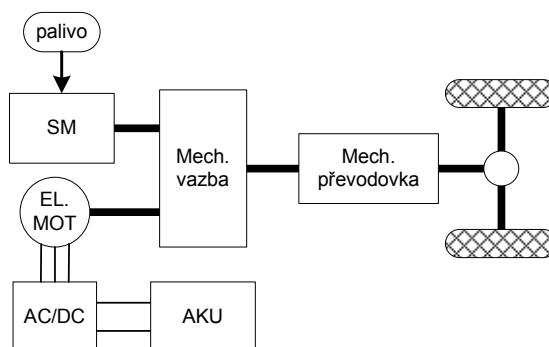
- Snížená účinnost přenosu energie od SM ke kolům vozidla díky dvojitou konverzi.
- Zvýšená hmotnost vozidla díky přítomnosti el. generátoru. El. generátor je dimenzován dle výkonu SM.
- Elektromotor musí být dimenzován na plný výkon vozidla.

2.2.2 PARALELNÍ HYBRIDNÍ POHON

Spalovací motor je mechanicky spojen s koly vozidla prostřednictvím vícestupňové převodovky. Elektromotor zde pracuje „paralelně“ ke spalovacímu motoru, jejich spojení je provedeno mechanickým vazebním členem. Pracovní bod SM lze volně řídit jen do určité míry (otáčky SM jsou dány rychlostí vozidla a zařazeným rychlostním stupněm, moment SM je určen momentem elektromotoru). Tato nevýhoda může být minimalizována použitím CVT (Continuous Variable Transmission) převodovky. Systém může být provozován v těchto základních módech: čistě elektrický

provoz, provoz jen na SM, kombinovaný provoz (SM + elektromotor). Pro dosažení plného trakčního výkonu je v provozu SM i elektromotor.

Při brzdění vozidla funguje elektromotor v generátorickém režimu a dochází k rekuperaci energie do akumulátorů.



Obr. 2.2 Paralelní hybridní pohon

Výhody:

- Vyšší účinnost přenosu výkonu oproti sériovému hybridnímu pohonu.
- Elektromotor nemusí být dimenzován na plný výkon vozidla.

Nevýhody:

- Pracovní bod SM nelze nastavovat zcela volně jako u sériové topologie.

Zde uvedený popis je platný pouze pro jeden typ paralelního hybridního pohonu. Existuje řada modifikací, které se ve svých vlastnostech odlišují, především v typu výkonové vazby mezi SM a elektromotorem (momentová vazba, otáčková vazba) a v počtu použitých elektrických strojů [46].

2.3 STRATEGIE ŘÍZENÍ HYBRIDNÍCH POHONŮ

Strategie řízení je soubor pravidel pro řízení energetických toků mezi komponentami hybridního pohonu tak, aby byl na kola vozidla dodán požadovaný výkon při minimální spotřebě paliva a s ohledem na stav nabití akumulátorů. Volba strategie řízení ovlivňuje dimenzování SM a akumulátorů.

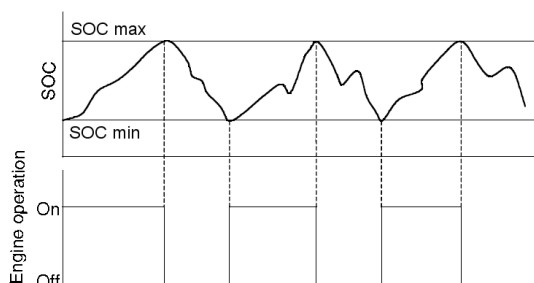
V praxi může být použito velké množství strategií řízení pro vozidla s různým účelem. U sériových hybridních pohonů se používají dvě základní strategie řízení založené na souboru pravidel [46]:

- maximum state-of-charge of peaking power source (Max. SOC-of-PPS),
- thermostat control (Engine-On-Off).

Z důvodu zachování významu byly použity anglické názvy, tak jak se vyskytují v literatuře.

Problematikou strategie řízení se zabývá řada vědeckých týmů a na toto téma bylo a je publikováno velké množství článků. Ve svém průzkumu jsem se zaměřil na články pojednávající převážně o řízení sériového hybridního pohonu autobusu. Následuje výčet některých z nich.

Hochgraf [30] zapíná a vypíná SM na základě stavu nabití akumulátorů („On-Off“ strategie). SM je buď vypnut nebo pracuje s konstantními otáčkami a pracuje tak vždy v optimálním pracovním bodě, který odpovídá průměrnému trakčnímu výkonu. Akumulátor je tak jediným zdrojem energie v pauzách stojícího SM, což má negativní dopad na jeho životnost.



Obr. 2.3 Ukázka On-Off strategie řízení SM

Jalil [32] upravil tuto strategii řízení tak, že SM řídí ne jen dle stavu nabití akumulátorů, ale i dle požadovaného trakčního výkonu. Tím omezil frekvenci cyklování akumulátorů a dosáhl dalších úspor ve spotřebě paliva.

Cao [31] upravil „On-Off“ strategii pomocí Fuzzy logiky a zjišťoval vliv filtrace žádaného hodnoty výkonu SM.

Andersson [19] ve své práci porovnal prakticky naměřené výsledky ze dvou hybridních autobusů s různou strategií řízení, přičemž se hlavně zaměřil na provoz SM. Dále se důkladně zabýval vlivem filtrace žádané hodnoty výkonu SM pro omezení transientního provozu SM a možností predikce výkonu z jízdního cyklu.

Z výsledků [31] i [19] vyplývá, že je nutné stanovit časovou konstantu jako kompromis mezi omezením transientního chování SM a ztrátami v akumulátorech. Dále byly vysloveny možné problémy se systémem dodatečné úpravy spalin, který pro svou funkci vyžaduje určité úzké pracovní teplotní pásmo, čímž se omezuje vypínání SM.

Jonasson [20] se ve své dizertační práci zabýval optimálním způsobem řízení vznětového SM v paralelním hybridním pohonu za účelem snížení spotřeby paliva a redukce NO_x . Výsledky ze simulací byly porovnány s výsledky z reálné jízdy vozidla Toyota Prius. Autor vyzkoušel optimalizaci chodu SM s ohledem na minimální měrnou spotřebu paliva, na minimální měrnou produkci emisí NO_x , provoz se zvýšenou recirkulací výfukových plynů (EGR), aplikoval vypínání válců SM při nízkých zatíženích. Dosáhl výrazných úspor ve spotřebě paliva a především omezil produkci emisí NO_x .

Univerzita Pardubice Dopravní fakulta Jana Pernera	Dizertační práce	15
---	------------------	----

2.4 APLIKACE HYBRIDNÍHO POHONU NA AUTOBUSECH

Patrně největší reálné nasazení autobusů s hybridním pohonem je v USA. Podle oficiálních údajů bylo ve městě New York v roce 2002 nasazeno v provozu 10 autobusů s hybridním pohonem, v roce 2006 již téměř 400, v roce 2009 přes 1000 kusů a dnes jejich flotila čítá přes 1600 autobusů. Další města, ve kterých je provoz hybridní autobusů velmi rozšířen, jsou Toronto, Seattle a San Francisco. Většinu z autobusů dodala firma Daimler Buses North America (Orion buses), která je největší světový výrobce hybridních autobusů. Do dnešního dne vyrobila přes 3000 hybridních autobusů a na trhu s hybridními autobusy dominuje.

V USA je ekonomika provozu hybridních autobusů velmi ostře sledována již od roku 1998, kdy došlo k jejich prvnímu nasazení do ostrého provozu. V roce 2006 byla prostřednictvím federální laboratoře pro obnovitelnou energii (NREL [47]) na žádost ministerstva energetiky USA (U.S. Department Of Energy [48]) provedena rozsáhlá studie provozu hybridních autobusů značky New Flyer (paralelní hybrid se systémem GM Allison EP50) po prvním roce jejich nasazení (2004) ve městě Seattle. Tato studie porovnávala ekonomické a provozní aspekty vyplývající z provozu nových hybridních autobusů a nových autobusů s konvenčním pohonem se vznětovým motorem, a to přímo sledováním parametrů v reálném provozu. Obdobná studie byla provedena již v roce 2002 a zopakována v roce 2008 ve městě New York, kde působí flotila hybridních autobusů značky Orion (typy Orion VI a Orion VII).

Výsledky studií zřetelně vypovídají ve prospěch hybridní technologie. Z výsledků studie provedené v roce 2006 vyplývá, že ve spotřebě paliva bylo dosaženo průměrných úspor 27 % (22 % přepočteno na cenu paliva), produkce emisí NO_x klesla o 17 až 39 % v závislosti na trase, emise pevných částic PM se snížily o 50 až 97 % dle trasy. Celkově bylo při provozu hybridních autobusů dosaženo finančních úspor o velikosti 15 %. V porovnání spolehlivosti a poruchovosti na tom byly hybridní autobusy hůře. Během služby měly průměrně o 13 % více závažných závad, které vedly ke stažení autobusu ze služby. Všechny údaje byly vztaženy vůči konvenčním autobusům se vznětovým motorem. Z výsledků studie z roku 2008 ve městě New York vyplývá, že nasazením II. generace hybridních autobusů Orion VII došlo k výraznému zvýšení jejich spolehlivost v provozu a k dalším úsporám paliva (dalších cca 5 %) a celkové úspoře provozních nákladů.

Většina hybridních autobusů v USA a Kanadě je vybavena systémy pohonu od firem Allison transmission GM, British Aerospace Engineering Systems nebo ISE corporation, přičemž jsou zastoupeny oba typy hybridních systémů (sériový i paralelní).

V Evropě sériová výroba hybridních autobusů teprve začíná. Většina významných evropských výrobců autobusů (Solaris, Mercedes Benz, Volvo, MAN, Scania) disponuje hybridním vozidlem alespoň ve formě prototypu, někteří je již vyrábí sériově.

2.4.1 ORION VII HYBRID BUS

Jedná se zřejmě o nejrozšířenější značku hybridního autobusu na světě.

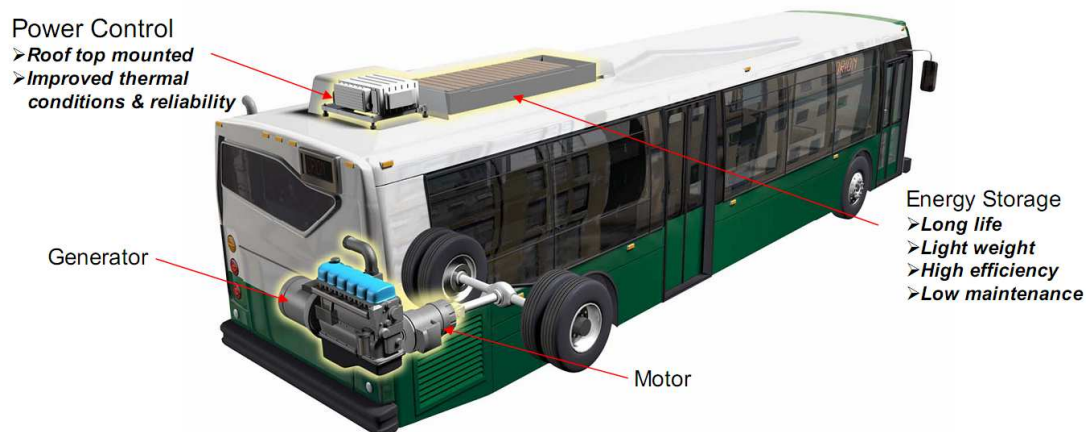


Obr. 2.4 Orion VII hybrid bus (2007)

Výrobce je Daimler Buses North America (dceřiná společnost německé firmy Daimler AG), systém hybridního pohonu dodává firma BAE System pod názvem Hybridrive®. Jedná se o sériový hybridní pohon. První hybridní nízkopodlažní autobusy Orion VI byly dostupné již v roce 1995, následovala druhá generace hybridních autobusů Orion VII (2001), v roce 2007 byla představena další vylepšená generace Orion VII Next generation.

Tab. 2.1 Parametry autobusu Orion VII (2007)

Koncepce	sériový hybridní pohon
Spalovací motor	vznětový, Cummins ISB 6,7 l
Trakční generátor	160 kW, PMSG
Trakční motor	186 kW, asynchronní
Akumulátory	Li-Ion, špičkový výkon 200 kW



Obr. 2.5 Uspořádání pohonu autobusu Orion VII

Zdroj: [51], [52], [53].

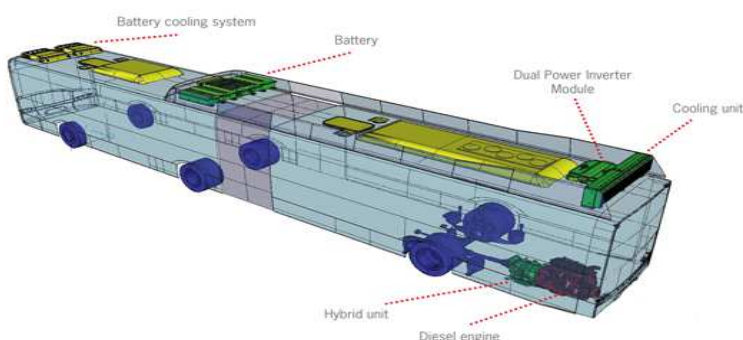
2.4.2 SOLARIS URBINO HYBRID

Tento polský výrobce autobusů má několikaleté zkušenosti s hybridním pohonem. Již od roku 2007 sériově vyrábí a prodává své vozy do řady evropských států (Polsko, Švýcarsko, Německo, Francie). Solaris má v nabídce 18 m kloubovou verzi městského autobusu Solaris Urbino 18 Hybrid a také 12 m verzi Urbino 12 hybrid.

V Solaris Urbino 18 hybrid je použito řešení pohonu od firmy Allison transmission, která má mnohaleté zkušenosti se svým systémem v USA a Kanadě. Autobus pohání dieselový motor Cummins o výkonu 180,5 kW plnící emisní normu EEV, akumulátory jsou typu Ni-MH s předpokládanou výdrží 6 let. Paralelní hybridní pohon EP50 fy Allison zajišťuje rozdělení výkonu mezi spalovací motor a elektromotor.



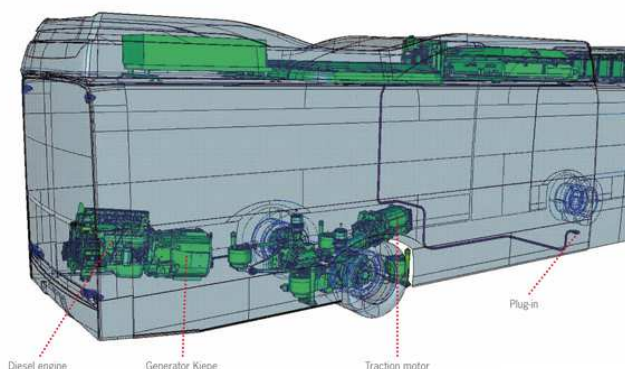
Obr. 2.6 Solaris Urbino
18 hybrid



Obr. 2.7 Rozmístění komponent v Urbino 18 hybrid

Solaris nově nabízí i hybridní autobus se sériovým hybridním pohonem s komponenty od německé firmy Vossloh Kiepe. Jako zásobníky energie jsou použity moderní Li-FePo akumulátory a superkapacitory. Systém řízení hybridního pohonu umožňuje napojení na GPS s následným automatické vypínáním spalovacího motoru při vjezdu do ekologických zón.

Parametry pohonu: elektromotor Vossloh Kiepe ASM 240 kW, generátor Kiepe PME 200/315/180 Pn: 195 kW, superkondenzátory 125V, trakční baterie Vossloh Kiepe ESM 201, brzdový odporník, trakční kontejner DGG 151, konektor nabíjení "plug-in".



Obr. 2.8 Uspořádání pohonu autobusu Solaris Urbino 18 Vossloh Kiepe

2.4.3 MERCEDES CITARO BLUETEC HYBRID

Německá společnost Daimler AG má s výrobou hybridních autobusů velké zkušenosti. Její dceřiná společnost Daimler Buses North America (Orion buses) je celosvětovým lídrem.



Obr. 2.9 Mercedes-Benz Citaro G BlueTec Hybrid

Zdroj: [38].

Mercedes-Benz představil v Evropě v roce 2007 hybridní autobus Citaro s dielelektrickým hybridním pohonem. Tento typ pohonu se montuje do 18 m kloubové verze autobusu. Je použit sériový hybridní pohon. Primárním zdrojem je dieselový spalovací motor o objemu pouhých 4,8 l a výkonu 160 kW.

Pohon kol zajišťují 4 elektromotory o výkonu 80 kW v nábojích kol. Akumulátory jsou typu Li-Ion a jsou schopny dodat výkon 180 kW. Všechny pomocné agregáty jsou poháněné elektricky.

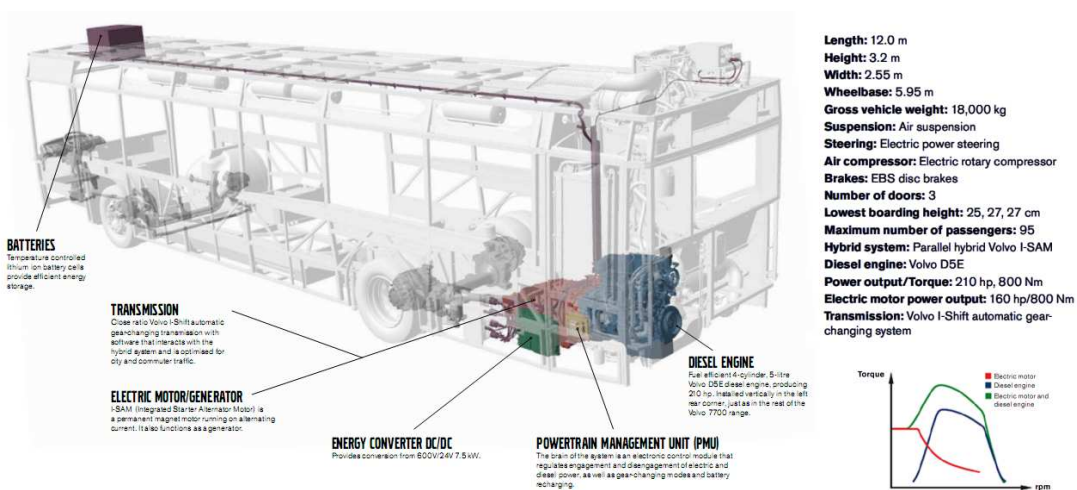
2.4.4 VOLVO 7700 HYBRID

Společnost v roce 2009 představila prototyp svého městského hybridního autobusu.



Hybridní pohon je přímo z konstrukce firmy Volvo, jedná se o koncepci paralelní hybrid. Ověřování pohonu probíhalo v Göteborgu a firma již má odběratele v Lucembursku a Švýcarsku. Firma chce vyrábět i dvoupatrové hybridní autobusy pro Londýn.

Dle dostupných informací je pro rozjezd vozidla používán pouze elektromotor, spalovací motor startuje až po dosažení rychlosti 20 km/h.



Obr. 2.10 Volvo 7700 Hybrid

2.4.5 ŠKODA H 12

Také Česká republika bude mít svého zástupce na poli hybridních autobusů. Škoda Electric a.s. vyvíjí městský nízkopodlažní 12 m hybridní autobus s označením Škoda H12. Je použita karoserie Solaris Urbino polského výrobce autobusů. Je použita koncepce sériového hybridního pohonu, jako akumulátory energie jsou použity Li-Ion akumulátory a superkapacitory, pohon je koncipován jako modulární (v budoucnu je možno spalovací motor nahradit např. palivovým článkem nebo akumulátory).

Nový hybridbus je vyvíjen z vlastní iniciativy Škoda Electric a.s., budoucí odběratel zatím není znám. Oficiální představení autobusu by mělo proběhnout v roce 2012. Momentálně probíhá testovací provoz v Plzni.



Obr. 2.11 Škoda H 12 – pohled 1



Obr. 2.12 Škoda H 12 – pohled 2

Zdroj [36].

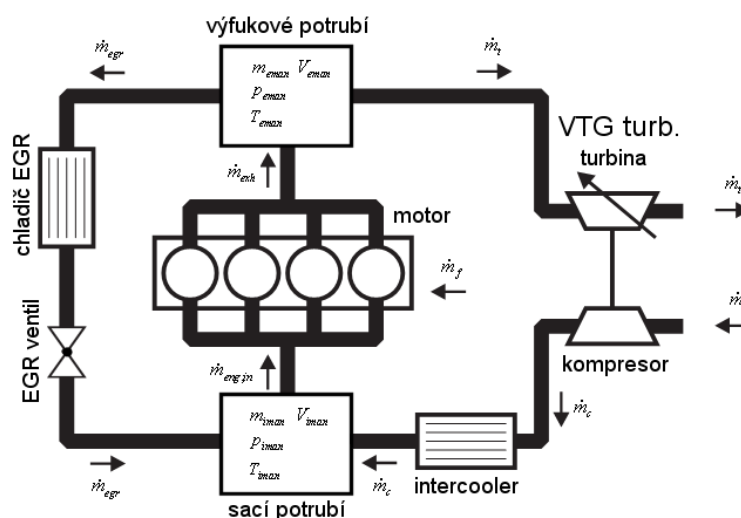
Na vývoji pohonné části se podílí Západočeská univerzita v Plzni a také Univerzita Pardubice. Výsledky této disertační práce byly aplikovány v systému řízení spalovacího motoru tohoto nově vznikajícího hybridního autobusu.

2.5 VZNĚTOVÝ SPALOVACÍ MOTOR

2.5.1 VLASTNOSTI A FUNKCE MODERNÍHO VZNĚTOVÉHO SM

Vznětový motor je díky jeho vysoké účinnosti a životnosti oblíbeným zdrojem výkonu v řadě aplikací. Přepřlované vznětové motory dosahují účinnosti přes 40 %. Tyto vlastnosti jsou dány především následujícími faktory. Tepelná účinnost všech spalovacích motorů roste s velikostí kompresního poměru. Při stlačování plynu roste jeho teplota, což je limitující faktor u zážehového motoru, kde jsme omezeni vznikem detonančního spalování. U vznětového motoru tento problém odpadá, poněvadž se stlačuje pouze vzduch bez obsahu paliva. To je vstříknuto až v požadovaný okamžik před horní úvratí, kdy dojde k jeho samovolnému a téměř okamžitému vznícení. Kroutící moment je u vznětových motorů řízen kvalitativně, tedy změnou směšovacího poměru vzduch/palivo, který se běžně pohybuje v rozmezí 1,4 až 7. Dovoluje tedy spalování chudých směsí, tudíž vznětový motor nepotřebuje škrtící klapku v sání. Proto je účinnost vznětového motoru oproti zážehovému především při nízkém zatížení vyšší.

Moderní vznětový motor je komplexní systém, který obsahuje řadu důležitých částí (Obr. 2.13). Značení v obrázku odpovídá použitému značení v modelu.



Obr. 2.13 Blokové schéma přeplňovaného vznětového motoru

Čerstvý vzduch, který do systému sání vstupuje přes vzduchový filtr (není na obrázku), je stlačován kompresorem turbodmyhadla. Vlivem stlačení stoupá tlak a teplota vzduchu. Zvýšení teploty je nežádoucí, proto vzduch dále prochází přes mezichladič, kde dojde k jeho ochlazení. Na rozdíl od zážehového motoru nepotřebuje vznětový motor škrtící klapku, takže vzduch dále prochází přímo do sacího potrubí motoru, kde může být smíchán se spaliny přivedenými zpět do sání přes systém EGR. Směs spaliny a čerstvého vzduchu je nasáta do válců, kde dojde k procesu spalování. Na opačné straně procházejí výfukové plyny výfukovým potrubím motoru, odkud je jejich menší část vedena zpět skrze chladič systému EGR na stranu sání. Zbývá část prochází turbínou turbodmyhadla (VTG – turbína s proměnnou geometrií), která pohání kompresor. Výfukové plyny pak odchází dále do systému čištění spaliny a tlumičem výfuku (nejsou na obrázku) ven do ovzduší.

Další důležitou součástí motoru, která není na obrázku uvedena, je použitý systém vstřikování nafty. Moderní motory používají výhradně přímé vstřikování nafty a to buď systémy se sdruženými vstřikovacími jednotkami (EUI či německy Pumpe-Düse, tzv. systém čerpadlo-tryska) nebo systém Common-Rail. Díky těmto moderním systémům vstřikování se dosahuje nižší spotřeby a nižší produkce škodlivých výfukových emisí. Standardem je rozdělení dávky paliva do několika menších částí (použití několika částečných vstřiků) a regulace vstřikovacího tlaku paliva. Vstřikovací tlaky dnes dosahují hodnot až 2000 Bar a precizní odměřování dávek paliva klade na výrobu vstřikovacích trysek obrovské požadavky.

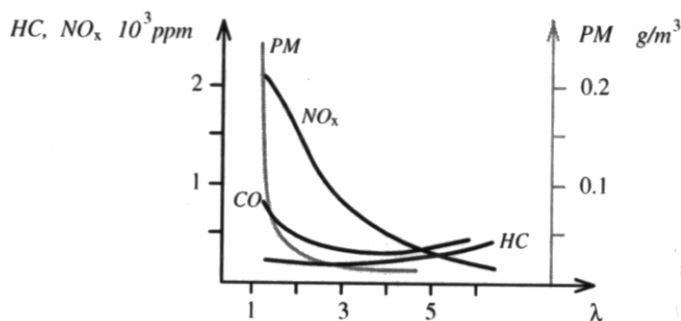
2.5.2 PRODUKCE EMISÍ VZNĚTOVÉHO MOTORU

Vznětové motory produkují zvýšený obsah oxidů dusíku NO_x a pevných částic PM (kouřivost) ve výfukových plynech. Produkce emisí nespálených uhlovodíků HC a oxidu uhelnatého CO je u vznětových motorů nižší než u zážehových, ovšem produkce oxidů dusíku NO_x je řádově vyšší. Vzdávající požadavky na minimální produkci škodlivých emisí nutí výrobce vyvíjet stále složitější a dražší prostředky pro jejich snížení.

Ke snížení produkce NO_x lze použít systém recirkulace spalin EGR kdy je část spalin vedena zpět do sání a následně do válce. Náhradou části čerstvého vzduchu spalinami dochází ke snížení špičkových teplot při spalování a tím ke snížení produkce NO_x .

Vzhledem ke stále narůstajícím omezením produkce škodlivých spalin z vozidlových motorů je nutné používat systémy na dodatečné čištění spalin. U vznětových motorů je lze rozdělit do dvou druhů:

- SCR – selektivní katalytická redukce pro snížení emisí NO_x
- DPF – filtry pevných částic



Obr. 2.14 Produkce emisí HC, CO, NO_x a PM u vznětového motoru s přímým vstřikem paliva v závislosti na součiniteli přebytku vzduchu λ , zdroj [2]

Jedním z hlavních faktorů ovlivňujících produkci škodlivých emisí je přebytek vzduchu při spalování. Díky tomu, že vznětový motor je řízen kvalitativně (dávkou paliva), součinitel přebytku vzduchu λ se u něj mění v širokých mezích (cca od 1,2 až po 7), což výrazně ovlivňuje produkci NO_x a PM (viz Obr. 2.14). Další parametry, které ovlivňují emise, jsou počátek vstřiku, vstřikovací tlak a množství recirkulovaných spalin.

Součinitel přebytku vzduchu λ je definován jako:

$$\lambda = \frac{m_{air}}{m_f \cdot AFR_s} \quad (1)$$

kde: m_{air} - množství vzduchu ve směsi [kg], m_f - množství paliva ve směsi [kg], AFR_s - stechiometrický poměr [kg/kg] (teoretické množství vzduchu pro spálení 1 kg paliva, 14,5 pro motorovou naftu)

Emise NO_x jsou způsobeny vysokou teplotou při spalování, pro jejich snížení se používá kombinace pozdního počátku vstřiku v kombinaci s recirkulací spalin EGR, což má za následek nižší špičkové teploty při spalování. Množství recirkulovaných spalin, které lze zpětně vést aniž by došlo k výraznému ovlivnění hoření směsi činí max. cca 40 %. Použitím EGR systému lze docílit snížení emisí NO_x až o 30 %.

Jak systém EGR, tak systém SCR mají bohužel negativní dopad na spotřebu paliva motoru. Při optimalizaci na minimální měrnou spotřebu paliva roste produkce NO_x , při optimalizaci na minimální produkci NO_x naopak roste spotřeba paliva o jednotky procent [20]. Výsledkem by měl být určitý kompromis, který je především nastaven požadavkem na splnění aktuálně platných emisních limitů.

Emise pevných částic jsou způsobeny nedokonalým hořením a špatným rozprášením paliva. Pro jejich snížení se používá kombinace dřívějšího počátku vstřiku a dostatečně vysokého tlaku, pod kterým je palivo vstřikováno (lepší rozstřík na menší kapičky).

Bohužel opatření, která snižují NO_x a PM působí proti sobě [2], takže výsledkem je jistý kompromis.

Díky stále striktnějším požadavkům emisních norem jsou výrobci nuceni používat u vznětových motorů systém dodatečné úpravy spalin (SCR, DPF), případně jejich kombinace. V novém emisním předpisu EURO VI (předpokládaná platnost od r. 2013) dochází k dalšímu razantnímu omezení složek NO_x a PM (Obr. 2.15). To má negativní dopad na růst složitosti a ceny vozidel.

	Platnost od	Testovací cyklus	CO [g/kWh]	NMHC [g/kWh]	CH4 (metan) [g/kWh]	Nox [g/kWh]	PM [g/kWh]
Euro 3	2000/10	ETC	5,45	0,78	1,6	5	0,02
Euro 4	2005/10		4	0,55	1,6	3,5	0,16
Euro 5	2008/10		4	0,55	1,1	2	0,03
Euro 6	2013/01		4	0,16	0,5	0,4	0,01

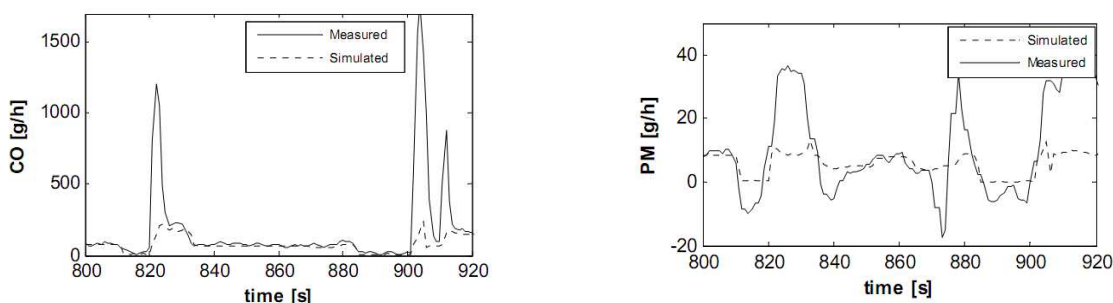
Obr. 2.15 Vývoj evropských limitů škodlivých emisí ve výfukových plynech pro vznětové motory nákladních vozidel a autobusů

Produkce emisí v přechodových stavech

Určování množství vyprodukovaných emisí v reálném provozu vozidla je obtížné. Při homologaci vozidel se používají standardizované testovací procedury (např. ETC, ESC + ELR test), které dovolují srovnat různé motory za stejných podmínek. Při měření v ustáleném stavu lze sestavit tabulku s hodnotami spotřeby paliva, hodnot emisních složek apod. Tyto tabulky dobře reprezentují chování daného motoru v ustáleném stavu.

Problematické je určování produkce emisí v přechodových stavech. V závislosti na jízdním cyklu, typu motoru a inteligenci systému řízení motoru mohou dosahovat akumulované rozdíly mezi skutečně naměřenými hodnoty a hodnotami vypočtenými na základě statických map až desítek procent (Obr. 2.16). Hlavním důvodem tohoto nesouladu je především odezva turbodmychadla. Při náhlém požadavku na vyšší výkon dochází k určité prodlevě než turbodmychadlo dodá do motoru potřebné množství čerstvého vzduchu. Během této doby může dojít k velkému snížení součinitele přebytku vzduchu λ až k hodnotám blízkým jedné, což má za následek především nadměrnou kouřivost (produkci pevných částic), Obr. 2.14.

Problematika přesného určování emisí v přechodových stavech není stále úplně prozkoumána, jak dokazuje řada publikovaných vědeckých článků a publikací, např. [9], [10], [11], [19].



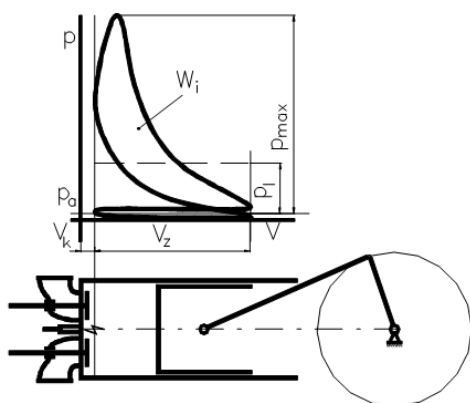
Obr. 2.16 Naměřené a simulované emise CO a PM během jízdního cyklu ETC, vznětový motor plnicí emisní normu EURO 3, zdroj: [10]

V hybridním vozidle by měl být spalovací motor provozován nejlépe s konstantním výkonem, výkonové špičky by měly být hrazeny z akumulátorů či superkapacitorů. I přes tento předpoklad, vytvořený model spalovacího motoru v této práci obsahuje korekci emisí v přechodových stavech. Je použit postup uvedený v [10] a [11]. Způsob korekce ve zmíněných pracích je založen na již zde zmíněném faktu, že hodnoty (některých) emisních složek jsou v přímé závislosti na součiniteli přebytku vzduchu λ . Při známé závislosti velikosti jednotlivých emisních složek na λ pak lze vypočítat korekční součinitel, kterým se vynásobí hodnota vyčtená ze statické mapy a získá se tak korigovaná (správná) hodnota emisí v přechodovém stavu.

2.5.3 ZÁKLADNÍ PARAMETRY SPALOVACÍHO MOTORU

Indikovaný výkon motoru je výkon získaný ze spalovacího procesu, který v sobě nezahrnuje třecí ztráty motoru a ztráty na výměnu obsahu náplně válců motoru. Indikovaný výkon lze přesně vypočítat z indikátorového (p-V) diagramu motoru. To ovšem vyžaduje speciální měřicí aparaturu a drahé čidlo na měření tlaku ve spalovacím prostoru.

Indikovaný výkon P_i se určí z plochy indikátorového diagramu motoru (Obr. 2.17).



Obr. 2.17 Indikátorový diagram čtyřdobého pístového spalovacího motoru, zdroj [4]

V_z – zdvihový objem

V_k – kompresní objem

$$\varepsilon = \frac{V_z + V_k}{V_k} \text{ - kompresní poměr}$$

W_i – indikovaná práce oběhu

$$p_i = \frac{W_i}{V_z} \text{ - střední indikovaný tlak}$$

$$P_i = W_i \cdot \frac{n}{2 \cdot 60} \text{ - střední indikovaný výkon}$$

čtyřtaktního spalovacího motoru

n – otáčky motoru

Výpočet indikovaného výkonu pouze z běžně měřených provozních veličin (teplota motoru, tlak v sáním, otáčky apod.), které snímá ŘJ motoru, je obtížný neboť indikovaný výkon závisí na řadě

Univerzita Pardubice Dopravní fakulta Jana Pernera	Dizertační práce	24
---	------------------	----

parametrů, které měřeny nejsou a také na opotřebením motoru. I přes to jsou dnešní elektronické řídicí jednotky moderních motorů schopny indikovaný výkon, respektive moment, vypočítávat za běhu motoru. Otázkou zůstává přesnost a spolehlivost této hodnoty.

Obecně je indikovaný výkon určen:

- (dolní) výhřevností paliva H_u (cca 42 MJ/kg pro naftu)
- indikovanou účinností η_i (je měřítkem efektivnosti termodynamického procesu)
- hmotnostnímu průtoku paliva do motoru \dot{m}_f [kg/s]

$$P_i = \eta_i \cdot H_u \cdot \dot{m}_f \quad (2)$$

Indikovaná účinnost η_i není konstantní, nýbrž závisí na těchto faktorech:

- otáčky,
- směšovací poměr vzduch/palivo (součinitel přebytku vzduchu λ),
- počátek vstříku,
- množství recirkulovaných spalin
- atd...

Efektivní výkon motoru je výkon, který lze odebrat na výstupní hřídeli motoru. Je to hodnota, kterou lze změřit na dynamometru. Vnější otáčková charakteristika (Obr. 2.18) je průběh max. efektivního momentu a výkonu motoru v závislosti na otáčkách.

Efektivní výkon motoru se vypočte jako:

$$P_e = P_i - P_f - P_p \quad (3)$$

nebo

$$P_e = P_i \cdot \eta_m \quad (4)$$

Kde: P_e - efektivní moment na výstupní hřídeli motoru,

P_i - indikovaný moment motoru,

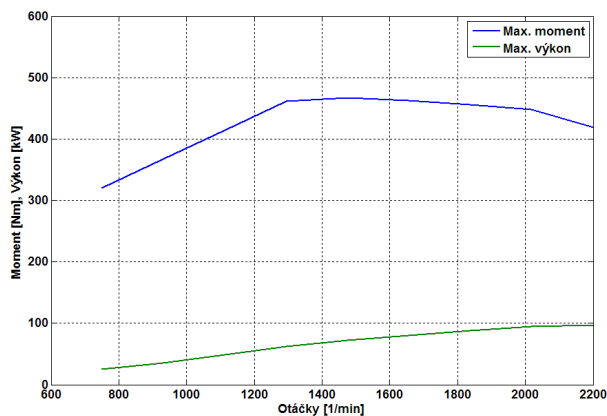
P_f - ztráty třením v motoru,

P_p - ztráty výměnou náplně válců motoru ,

η_m - mechanická účinnost motoru

Ztráty třením mají přibližně kvadratickou závislost na otáčkách a dosahují velikosti cca 20 % při jmenovitém výkonu motoru. Samotné ztráty výměnou náplně válců motoru jsou u přeplňovaných vznětových motorů malé, protože nemají škrťací klapku v sání (řídí se dávkou paliva, nikoliv škrćením průtoku vzduchu do motoru). Tyto pasivní ztráty se určují experimentálně.

Vnější otáčková charakteristika udává průběh efektivního momentu a výkonu motoru v závislosti na otáčkách při plně otevřeném přívodu paliva (resp. škrtecí klapky u zážehového motoru). Jsou to ve skutečnosti charakteristiky dvě. Vnější charakteristika momentu - průběh maximálního efektivního momentu a vnější výkonová charakteristika – průběh maximálního efektivního výkonu SM v závislosti na otáčkách.



Obr. 2.18 Vnější otáčková charakteristika motoru

Střední indikovaný a efektivní tlak

Kroutící moment spalovacího motoru závisí na zdvihovém objemu motoru. Pro porovnání využití objemu u motorů různých velikostí je zaveden ukazatel střední indikovaný nebo efektivní tlak, který je definován jako poměr odvedené práce za cyklus ku zdvihovému objemu motoru. Střední indikovaný tlak odpovídá indikovanému výkonu (zahrnuje mechanické ztráty), střední efektivní tlak odpovídá efektivnímu výkonu měřitelnému na výstupní hřídeli motoru (neobsahuje mechanické ztráty).

Pro čtyřtákní spalovací motor platí:

$$p_i = \frac{W_i}{V_z} = \frac{P_i \cdot 2 \cdot 60}{V_z \cdot n} \quad (5)$$

$$p_e = \frac{P_e \cdot 2 \cdot 60}{V_z \cdot n} = M_e \cdot \frac{4\pi}{V_z \cdot 1000} \quad (6)$$

Kde: p_i - střední indikovaný tlak,

p_e - střední efektivní tlak,

P_i - indikovaný výkon motoru,

P_e - efektivní výkon motoru,

n - otáčky motoru,

V_z - zdvihový objem motoru

Měrná spotřeba paliva a celková účinnost motoru

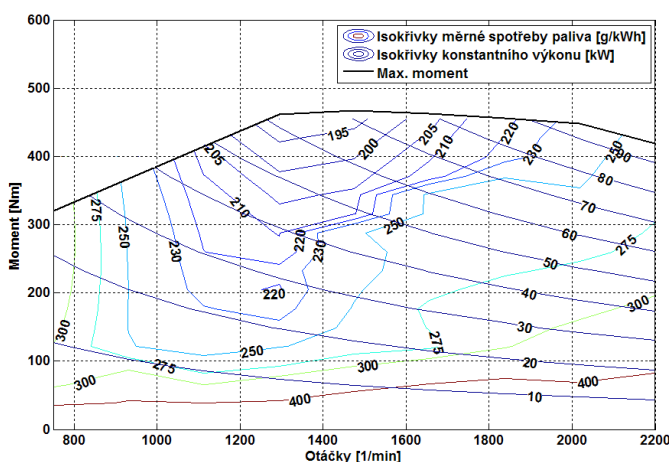
Pokud se provádí měření na spalovacím motoru, udává se běžně spotřeba paliva v gramech za sekundu, \dot{m}_f [g/s]. To není vhodný ukazatel využitelnosti energie v palivu. Proto je zavedena měrná spotřeba paliva, což je spotřeba paliva v gramech za sekundu vztážená k výkonu motoru a vyjadřuje se v jednotkách [g/kWh].

$$m_{sf} = \frac{\dot{m}_f}{P_e} \cdot 3,6 \cdot 10^6 \text{ [g/kWh]} \quad (7)$$

Kde: \dot{m}_f - průtok paliva do motoru [g/s],

P_e - efektivní výkon motoru [W]

Měrná spotřeba je kvalitativním ukazatelem přeměny tepelné energie paliva na mechanickou práci motoru. U automobilních zážehových motorů se dosahuje hodnot 230 g/kWh, u vznětových motorů až 190 g/kWh. U velkých stacionárních motorů ještě méně. Průběh měrné spotřeby paliva v každém pracovním bodě motoru vyjadřuje úplná charakteristika motoru, Obr. 2.19.



Obr. 2.19 Úplná charakteristika motoru

Je to průběh křivek konstantních hodnot (isokřivky) měrné spotřeby paliva, zakreslený do momentové charakteristiky motoru spolu s hyperbolami konstantního výkonu. Úplná charakteristika motoru je základním podkladem pro nalezení optimálního průběhu zatěžovací charakteristiky, tj. dvojic hodnot momentu a otáček, při kterých SM pracuje s nejvyšší účinností a minimální měrnou spotřebou paliva.

Při znalosti spotřeby paliva v daném pracovním bodě lze určit celkovou účinnost motoru:

$$\eta_c = \frac{P_e}{\dot{m}_f \cdot H_u} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (8)$$

$$P_e = \dot{m}_f \cdot H_u \cdot \eta_i \cdot \eta_m = \dot{m}_f \cdot H_u \cdot \eta_c \quad (9)$$

Kde: P_e – efektivní výkon motoru v daném pracovním bodě [W],

M_e – efektivní moment motoru [Nm],

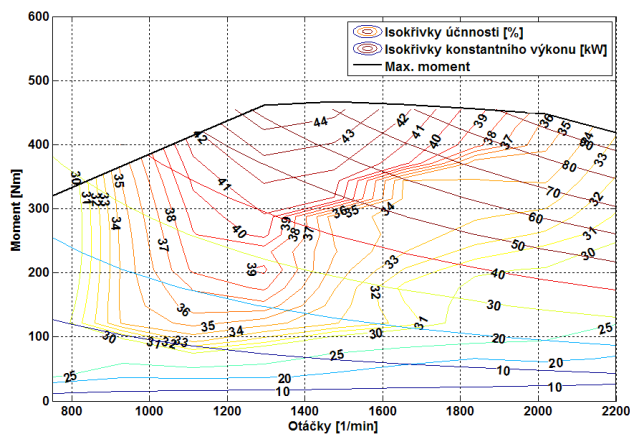
n – otáčky motoru [1/min],

\dot{m}_f - průtok paliva do motoru [kg/s],

H_u - (dolní) výhřevnost nafty $42 \cdot 10^6$ J/kg,

η_i - indikovaná účinnost motoru,

η_m - mechanická účinnost motoru.



Obr. 2.20 Charakteristika účinnosti motoru

Nejoptimálnější provozní oblast vznětového spalovacího motoru je v oblasti středních otáček a plně otevřeného přívodu paliva. Při zvyšování otáček rostou mechanické ztráty a účinnost klesá. Maximální celková účinnost, kterou lze se spalovacím motorem dosáhnout, bývá cca 45 % a to pouze v úzké pracovní oblasti. Účinnost vznětových motorů je vyšší než u zážehových díky vyššímu kompresnímu poměru.

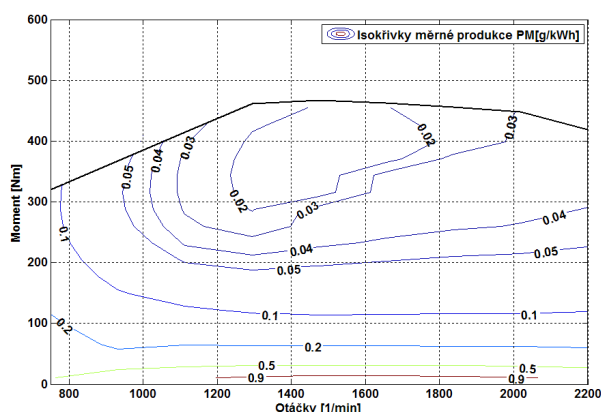
Měrné emise výfukových plynů

Množství vyprodukovaných emisí (CO, HC, NO_x a PM) je důležitým provozním ukazatelem spalovacího motoru. Koncentrace jednotlivých složek ve výfukových plynech se obvykle udává v procentech nebo v miliontinách (ppm – parts per milion) celkového objemu. Měrné emise se naproti tomu vypočítají jako hmotnostní množství emisní složky na kilowatthodinu provozu motoru.

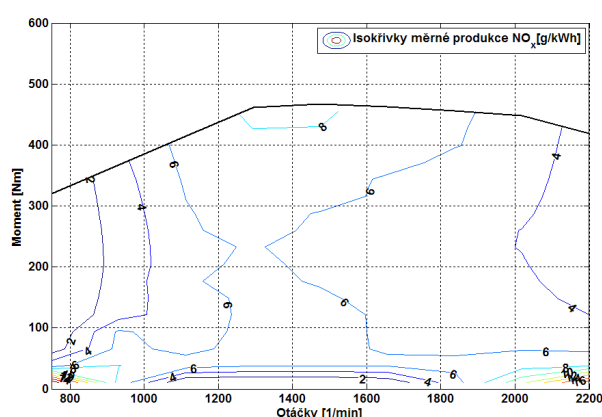
$$m_{sNO_x} = \frac{\dot{m}_{NO_x}}{P_e} \cdot 3,6 \cdot 10^6 \text{ [g/kWh]} \quad (10)$$

Kde: \dot{m}_{NO_x} - hmotnostní průtok emisní složky [g/s], P_e - efektivní výkon motoru [W]

Obdobně pro ostatní složky emisí (CO, HC, PM).



Obr. 2.21 Mapa měrné produkce PM



Obr. 2.22 Mapa měrné produkce NO_x

Někdy se množství emisí vztahuje k množství spotřebovávaného paliva, pak se tento poměr nazývá emisní index (EI) příslušné emisní složky:

$$m_{sNO_x} = \frac{\dot{m}_{NO_x}}{\dot{m}_f} \quad [-] \quad (11)$$

Kde: \dot{m}_{NO_x} - hmotnostní průtok emisní složky [g/s],

\dot{m}_f - průtok paliva do motoru [g/s].

Obdobně pro ostatní složky emisí (CO, HC, PM).

2.5.4 SIMULAČNÍ MODELY SM

Pro nalezení optimálního chodu spalovacího motoru v hybridním pohonu vozidla je nutné vytvořit model tohoto motoru. Tato kapitola poskytuje přehled různých přístupů k modelování spalovacích motorů. V jejím závěru je vybrán vhodný typ modelu.

Simulace spalovacího motoru může být provedena v různém časovém měřítku. Na jedné straně existují modely, které simulují termodynamické procesy probíhající uvnitř válce spalovacího motoru v rámci jednoho cyklu, na straně druhé to jsou modely, které simulují chování motoru s ohledem na jeho vnější veličiny (moment, otáčky apod.) v časovém měřítku několika desítek a stovek cyklů – tzv. „mean-value“ (MVM) modely. Pro potřeby simulací pohonného řetězce vozidel nebo návrhu regulačních struktur je vhodný právě naposled jmenovaný typ modelu, protože není příliš náročný na výpočetní výkon (v porovnání s prvně zmíněným způsobem modelování) a dostatečně přesně simuluje chování i v dynamických režimech.

Používané metody modelování spalovacího motoru

Modely simulující dění v rámci jednoho cyklu motoru

Tyto modely simulují termodynamické procesy, které se odehrávají v rámci jednoho nebo více pracovních cyklů uvnitř motoru (např. výměna náplně válce, hoření směsi, produkce emisí, výpočet

kroučícího momentu apod.). Dokáží přesně zachytit povahu spalovacího motoru. Simulace to jsou velmi detailní a tudíž časově náročné, tento typ modelování není z obou důvodů vhodný pro simulaci pohonného řetězce vozidla, kde z hlediska analýzy nejsou procesy odehrávající se ve spalovacím motoru během jeho pracovního nijak přínosné.

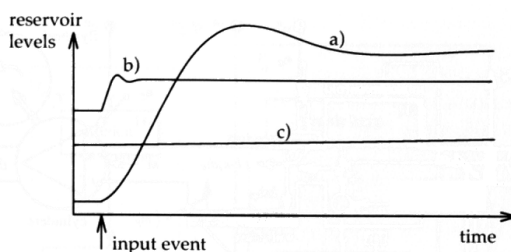
Mean value models

Patří do skupiny kvazistacionárních modelů.

Úkolem MVM modelů motoru je výpočet středních hodnot vnějších veličin jako jsou např. otáčky, moment motoru, tlak v sání, množství nasávaného vzduchu apod. a vnitřních proměnných jako je např. termální nebo objemová účinnost motoru a to v ustálených i přechodových stavech s rozumnou přesností (řádově několik procent) [2]. MVM modely předpokládají, že spalovací proces probíhá po každé stejně, a neuvažují „diskrétní“ povahu pístového spalovacího motoru (střídající se pracovní fáze motoru), nýbrž uvažují, že všechny probíhající procesy a jejich následky jsou „rozprostřeny“ v rámci jednoho cyklu motoru (jako kdyby měl motor nekonečný počet nekonečně malých válců). MVM modely SM zachycují i dynamiku význačných komponent motoru (sací a výfukové potrubí, turbodmychadlo, moment setrvačnosti motoru, otáčky apod.).

Nezávisle proměnnou v MVM je čas. Časové měřítko pro výpočet středních hodnot veličin je v řádu několika otáček či cyklů motoru, tedy dostatečně krátké pro dostatečně přesný výpočet i pro rychle se měnící střední hodnotu jakékoliv vnější veličiny motoru.

- Pro veličiny, jejichž doba ustálení je v řádu desítek či stovek cyklů motoru, se používá popis pomocí diferenciálních rovnic (např. zrychlování otáček motoru).
- Pro veličiny, které se ustálí během jednoho cyklu motoru se používá popis pomocí algebraických rovnic (např. průtok vzduchu přes škrtkovací klapku).
- Veličiny, jejichž doba ustálení je delší než cca 1000 cyklů, jsou vyjádřeny pomocí konstant (např. teplota motoru).



Obr. 2.23 Měřítko veličin v mean-value modelu, zdroj: [2]

- a) veličina s význačnou dynamikou – popis diferenciální rovnicí (např. tlak v sání)
- b) velmi rychlá veličina – popis algebraickou rovnicí (např. kroučící moment)
- c) velmi pomalá veličina – popis konstantou (např. teplota motoru)

MVM modely se používají především pro návrh regulačních struktur a řízení vlastního spalovacího motoru nebo mohou být součástí jiného modelu např. jízdní dynamiky vozidla.

MVM modely se sestavují na základě zákonů mechaniky a dynamiky kapalin a plynů, základních termodynamických procesů a ve velké míře se používají look-up tabulky, ze kterých jsou vyčítány naměřené hodnoty některých veličin, jejichž výpočet by byl příliš složitý nebo nepřesný. Vstupem do tabulek jsou obvykle veličiny prakticky měřitelné, např. kroučící moment a otáčky.

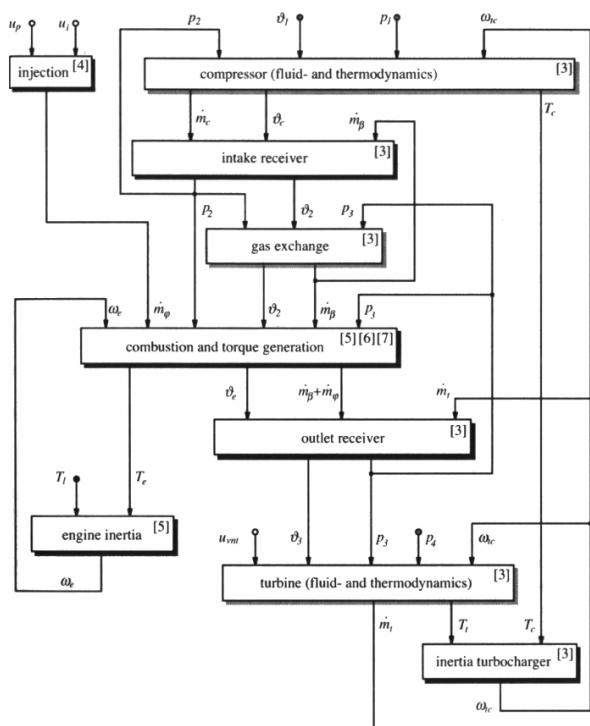
Tento způsob modelování nezohledňuje, zda se motor nachází v ustáleném pracovním režimu nebo naopak v přechodovém stavu, proto se modely často doplňují různými korekcemi, které modifikují vlastnosti modelu v přechodových stavech (např. korekce produkce emisí). Přednost toho typu modelování tkví v jeho jednoduchosti. Model není vhodný pro případy, kdy motor pracuje převážně v přechodových stavech.

Teorie MVM modelů spalovacího motoru je známá již přes 30 let [5], během této doby se vyvíjela [2], [12], [14], [17], [21], [22] a s nástupem výkonné výpočetní techniky začala být používána i při implementaci algoritmů v řídicích jednotkách vozidel.

Jak dokazuje řada vědeckých článků a prací ([14], [15], [18], [19], [20]), je MVM model vhodný i pro popis chování spalovacího motoru, který je součástí hybridního pohonu.

Vlastní model se vždy skládá z několika podsystémů, které modelují význačné funkční celky reálného spalovacího motoru. V případě přepřňovaného vznětového motoru se jedná především o tyto funkční celky:

- Sací a výfukové potrubí
- Turbodmychadlo (turbína + kompresor)
- Mezichladič stlačeného vzduchu
- Recirkulace spalin (EGR)
- Výpočet kroutícího momentu a otáček motoru



Obr. 2.24 Blokové schéma a vazby mezi bloky modelu přepřňovaného vznětového motoru (EGR a mezichladič stlačeného vzduchu se zde neuvažují, nejsou zakresleny)

zdroj: [2]

Univerzita Pardubice Dopravní fakulta Jana Pernera	Dizertační práce	31
---	------------------	----

Popis funkce jednotlivých bloků je kombinací fyzikálních zákonů, do jisté rozumné míry zjednodušených, statických 2D look-up tabulek (map) s údaji naměřenými na reálném motoru, případně empiricky nebo experimentálně zjištěných závislostí ve formě polynomiálních funkcí, jejichž koeficienty jsou určeny regresí z naměřených dat.

Statistické modely

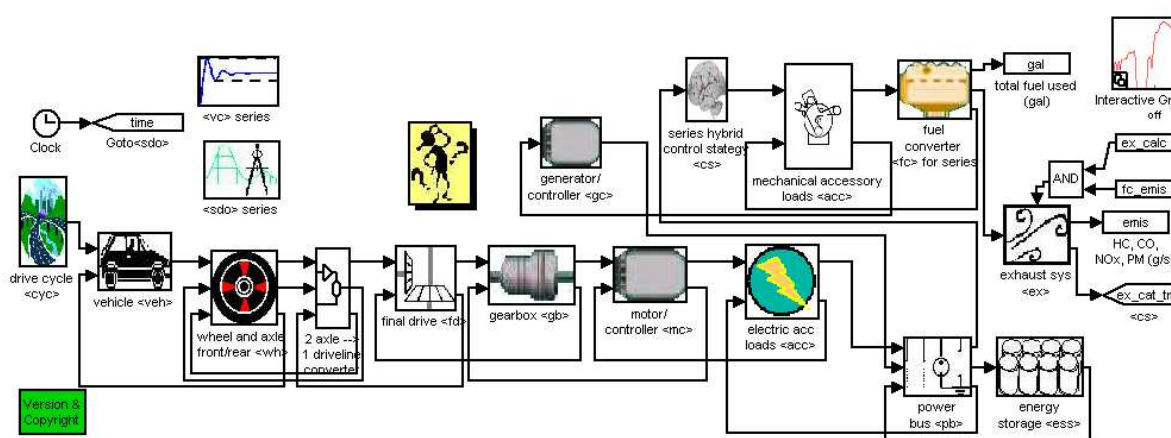
Tato metoda je založena na zpracování souboru naměřených dat získaných z velkého počtu testovaných motorů či vozidel. Statistické modely jsou pak vytvořeny na základě toho souboru naměřených dat, ve kterých lze sledovat určitý trend. Tento způsob modelování je vhodný pro stanovení určitých obecných vlastností určité skupiny motorů či vozidel. Příkladem tohoto přístupu je např. studie programu COST346 [9], jejíž jedna část se zabývala tvorbou modelu produkce emisí z nákladních vozidel různých kategorií.

Backward-facing modely

Typickým znakem těchto modelů je opačný směr toku informací, a to ve směru následek → příčina, tedy od konce. Tento typ modelu je použit např. v simulačním SW ADVISOR vytvořený společností NREL (National Renewable Energy Laboratory). ADVISOR [28] je komerční SW určený pro analýzu hybridního pohonu a návrh algoritmů řízení hybridního pohonu vozidla. ADVISOR byl vyvinut za účelem analýzy pohonu vozidla, není určen pro detailní návrh tohoto pohonu. Používá kvazistacionární modely, simulace probíhají s časovým rozlišením řádově jedna vteřina, takže model není vhodný pro rychlé přechodové děje (rychlé elektrické děje, vibrace apod.). Vstupem do modelu pohonu vozidla je žádaná rychlost, podle které se určí momenty, otáčky a výkony v jednotlivých částech (komponentách) pohonu tak, aby byl splněn požadavek na rychlost. Vzhledem k použitému zpětnému toku informací od následku k příčině (od kola k převodovce až k primárnímu zdroji), je tento princip simulace pohonu vozidla nazýván jako „backward-facing“.

SW umožňuje definovat z jakých částí se pohon skládá, definovat jejich parametry (lze vybrat z knihovny nebo definovat své vlastní), zvolit typ strategie řízení nebo si vytvořit svojí vlastní, určit jízdní cyklus a provést simulaci jízdy vozidla s následným automatickým vyhodnocením výsledků.

Celkový model vozidla se skládá z dílčích komponent pohonného řetězce (primární zdroj, převodovka, elektromotor, el. generátor, akumulátor, jízdní odpory apod.), které jsou navzájem propojeny. Vstupem do modelu je žádaná hodnota rychlosti vyčtená z předepsaného jízdního cyklu (Obr. 2.25). Hodnota rychlosti určuje velikosti momentů, otáček a výkonů jednotlivých komponent v pohonném řetězci vozidla tak, aby byla splněna žádaná hodnota rychlosti vozidla. Ve výpočtech se zohledňují limitní hodnoty parametrů, limitace se promítají zpět do předchozích bloků.



Obr. 2.25 Model pohonu v SW ADVISOR

Tomuto „backward-facing“ principu musí být přizpůsobeny všechny dílčí modely komponent v pohonném řetězci. Ty jsou v ADVISORu popsány převážně pomocí look-up tabulek (účinnosti, ztráty, optimální pracovní body, spotřeba paliva, produkce emisí apod.).

Primární zdroj v ADVISORu (označený jako „fuel converter“) může být buď spalovací motor, palivový článek nebo jiný. Nezávisle na zvoleném typu je vždy vstupem do modelu žádaná hodnota výkonu, na jejímž základě je vypočten odpovídající pracovní bod (moment, otáčky, množství paliva), které zajistí požadovaný výkon. Při výpočtu se zohledňují ztráty způsobené odběrem pomocných spotřebičů a výkon na překonání momentu setrvačnosti. Důležitým rysem tohoto modelu je to, že nezávisle proměnnou jsou zde otáčky. Teprve následně se dopočítává skutečný moment motoru, který odpovídá těmto otáčkám dle žádaného výkonu a požadovanému zrychlení nebo zpomalení otáček motoru. Žádaná hodnota výkonu je vypočtena v bloku připojeném na vstup primárního zdroje (např. nadřazená strategie řízení nebo převodovka). Vypočtený pracovní bod v daném simulačním kroku určuje spotřebu paliva a produkci emisí primárního zdroje. Spotřeba paliva a produkce emisí jsou uloženy v tabulkách v závislosti na otáčkách a momentu. Na spotřebu paliva a emise jsou aplikovány korekční faktory, pokud není motor zahřátý na pracovní teplotu.

Zvolený typ modelu SM v této práci

Po zvážení výhod a nevýhod všech typů modelů SM byl nakonec zvolen MVM model.

Stacionární spotřeba paliva a produkce emisí spalovacího motoru jsou uloženy v look-up tabulkách jako funkce otáček a momentu. Z těchto tabulek pak lze určit optimální pracovní bod spalovacího motoru s ohledem na požadovaný výstupní výkon např. s ohledem na minimální spotřebu paliva. Nebere se v potaz teplota motoru (předpokládá se pracovní) a opotřebením motoru.

Kvazistacionární modely založené na vyčítání hodnot z map a tabulek jsou přesné pouze při pomalých změnách zatížení/otáček. Produkce emisí v přechodových stavech (při jejich neuvažování) totiž neodpovídá hodnotám vyčítaných z map, protože ty byly změřeny v ustálených stavech. Hodnoty emisí v přechodovém stavu (tj. při náhlé změně zatížení motoru) se od hodnot v ustáleném stavu více či méně odlišují. U vznětového přeplňovaného motoru je produkce emisí (především NO_x a pevné částice jsou problém) v přechodovém stavu nejvíce ovlivněna velikostí součinitele přebytku vzduchu, který závisí na aktuálním množství nasávaného vzduchu, množství

Univerzita Pardubice Dopravní fakulta Jana Pernera	Dizertační práce	33
---	------------------	----

recirkulovaných spalín a množství vstříkovaného paliva. Hodnoty těchto veličin se ovšem v přechodovém stavu odlišují od svých ustálených hodnot. Významnou roli zde hraje turbo efekt (turbo lag) turbodmychadla, kdy při požadavku na vyšší kroutící moment motoru určitou chvíli trvá než turbodmychadlo vytvoří potřebný plnicí tlak, což má za následek přechodně zvýšenou produkci emisí. Řídící jednotky motoru proto omezují v těchto případech množství vstříkované nafty a recirkulovaných spalín s ohledem na kouřivost motoru. Proto řada autorů vědeckých článků a prací tento složitý problém neřeší nebo zavádí v tomto režimu určité korekce, které nějakým způsobem upravují hodnoty platné pro ustálený režim. Otázkou je ovšem přesnost těchto korekcí. Je také otázkou jak moc se do celkové hodnoty vyprodukovaných emisí za určitý jízdní cyklus při dané konfiguraci hybridního vozidla a pracovním režimu spalovacího motoru promítne odlišná produkce emisí způsobená přechodovými stavy.

Výhody uvažovaného modelu

- Uvažování dynamiky motoru (moment setrvačnosti, dynamika sání a turbodmychadla)
- Přesnost simulace

Nevýhody

- Výpočetní náročnost (relativní)
- Náročné na parametrizaci (nutné mít dostatek známých parametrů pro konfiguraci modelu)

Jak z výše uvedeného vyplývá, pro parametrizaci vytvořeného modelu je zapotřebí znát řadu informací a parametrů spalovacího motoru, pro který má být model vytvořen. Při konstrukci modelu se vycházelo z dostupných informací o konkrétním motoru. Množství těchto informací nebylo dostatečné, což do jisté míry ovlivnilo přesnost vytvořeného modelu.

Konkrétní vlastnosti realizovaného modelu SM, včetně jeho popisu, jsou uvedeny v kapitole 3.3.

2.6 ELEKTRICKÝ GENERÁTOR A USMĚRŇOVAČ

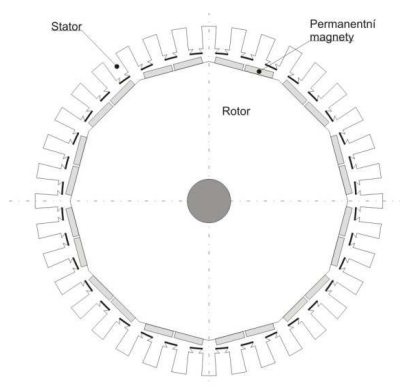
2.6.1 SYNCHRONNÍ STROJ S PERMANENTNÍMI MAGNETY

Zvládnutí technologie permanentních magnetů ze vzácných zemin vytvořilo předpoklady pro jejich aplikace v elektrických točivých strojích. Největšího rozšíření dosáhlo využívání permanentních magnetů ze vzácných zemin u synchronních strojů a to jak u motorů (PMSM), tak u generátorů (PMSG). K hlavním výhodám synchronních strojů s permanentními magnety patří zejména:

- menší objem, hmotnost a moment setrvačnosti (až trojnásobné snížení oproti asynchronnímu stroji stejného výkonu a otáček),
- velká magnetická indukce,
- trvale nabuzený rotor – není potřeba energie na buzení,

- velká momentová přetížitelnost,
- vyšší účinnost zejména v důsledku absence Jouleových ztrát v rotoru,
- rotor může být vytvořen z plného materiálu (téměř neměnný magnetický tok) nebo může být dutý (snížení momentu setrvačnosti).

Již téměř 20 let se synchronní motory s permanentními magnety využívají v pohonech pro servotechniku, automatizační techniku a robotiku. V současnosti je navíc rozšířeno používání těchto strojů ve velké míře v oblasti trakce (zejména trakční pohony elektrických silničních i kolejových vozidel) a energetických systémů – generátory ve větrných elektrárnách, zdrojové systémy na vozidlech se spalovacím motorem. Synchronní stroje s permanentními magnety se vyrábějí pro výkony až 1 MW.



Obr. 2.26 Klasická konstrukce PMSM

Konstrukce synchronních strojů s permanentními magnety má různé podoby v závislosti na výkonu a aplikaci. Nejčastěji se používají synchronní stroje s klasickou koncepcí. Na statoru má stroj umístěno statorové trojfázové vinutí, které je uloženo v drážkách magnetického obvodu, podobně jako u asynchronního stroje. Uvnitř statoru je umístěn rotor, který nese permanentní magnety. Rotor je často odlehčený dutinami, neboť magnetický tok se v těchto případech uzavírá v povrchové vrstvě. Póly permanentních magnetů jsou tvořeny dílčími segmenty. Rozměry těchto segmentů jsou i u výkonných motorů omezeny na desetiny, maximálně jednotky cm. Permanentní magnety jsou ze speciálních slitin, nejčastěji SmCo (samarium – kobalt) nebo NdFeB (Neodym – železo – bór). Tyto magnety mají remanentní magnetickou

indukci B_r od 0,8 do 1,2T. Jsou tedy zdrojem velkého magnetického toku a tím umožňují zmenšení objemu stroje. Synchronní stroje s permanentními magnety se charakterem blíží stroji s válcovým rotorem, hodnoty podélné a příčné indukčnosti jsou si blízké. Konstrukce synchronního stroje s permanentními magnety klasické koncepce je zřejmá z Obr. 2.26. Při provozu synchronních strojů s permanentními magnety vznikají v magnetech ztráty vířivými proudy od vyšších harmonických složek proudu statoru. Proto je nutné zajistit co nejkvalitnější průběh statorového proudu, v případě provozu ve vazbě na měnič pracující se šířkově pulzní modulací se volí nejvyšší dostupná modulační frekvence zabezpečující kvalitní promodulování křivky proudu.

2.6.2 PULZNÍ USMĚRŇOVAČ

Na výstupu el. generátoru (PMSG) je zařazen třífázový můstkový pulzní usměrňovač, který usměrňuje střídavé napětí z el. generátoru. Výkonová část zapojení třífázového pulzního usměrňovače odpovídá můstkovému zapojení třífázového střídače (blok PR na Obr. 2.27). V pulzních usměrňovačích malých a středních výkonů se téměř výhradně používají spínací prvky IGBT.

Pulzní usměrňovače pracují se šířkově pulzní modulací. Princip generování šířkově pulzní modulační pulzních usměrňovačů je stejný jako u střídačů pro asynchronní a synchronní motory. Šířkově pulzní modulační dává měnič velmi výhodné vlastnosti, které nejsou dosažitelné pomocí usměrňovačů diodových nebo tyristorových. Jedná se zejména o odběr vstupního střídavého proudu s téměř sinusovým průběhem, možnost řízení účinnku, se kterým je proud ze sítě odebírán, říditelnost

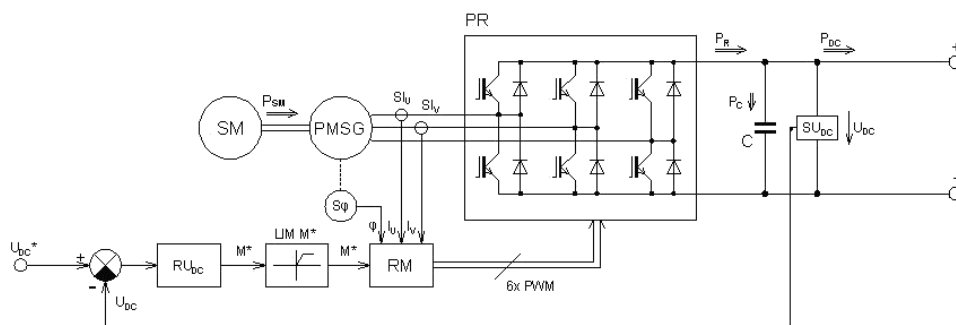
výstupního stejnosměrného napětí a možnost přechodu energie v obou směrech. Všechny tyto výhody se uplatní v sériovém hybridním pohonu vozidla: řízené zvyšování výstupního stejnosměrného napětí, sinusový odběr proudu na vstupu, který bude příznivý pro PMSG (zvýšení účinnosti, snížení pulzačních momentů), startování SM pomocí PMSG.

Pulzní usměrňovač je možné plně řídit pouze v případě, kdy je hodnota výstupního stejnosměrného napětí vyšší než amplituda sdruženého napájecího napětí na vstupní straně:

$$U_{DC} > \sqrt{2} \cdot U_{1sdruž} \quad (12)$$

Při nesplnění této podmínky je možno pulzní usměrňovač provozovat, avšak není již možno řídit jeho vstupní účinník a je omezena hodnota průchozího výkonu.

Provoz pulzního usměrňovače napájeného z PMSG poháněného spalovacím motorem je specifický proměnnými otáčkami (např. 700 až 2300 1/min). Tím se mění frekvence a efektivní hodnota indukovaného a svorkového napětí při konstantním budícím toku. Vhodným řízením pulzního usměrňovače je možné eliminovat výkyvy vstupního střídavého napětí ve výstupním stejnosměrném napětí – pulzní usměrňovač může pracovat jako stabilizátor stejnosměrného výstupního napětí U_{DC} . V tomto případě se používá regulační struktura vycházející z principů regulace točivého momentu synchronních strojů.



Obr. 2.27 Struktura zdrojové soustavy s PMSG a pulzním usměrňovačem

Na Obr. 2.27 je blokově znázorněna struktura zdrojové soustavy s PMSG, pulzním usměrňovačem a regulací výstupního napětí usměrňovače. Spalovací motor (SM) dodává mechanickou energii alternátoru PMSG. Výstupní třífázové napětí alternátoru napájí vstup pulzního usměrňovače PR. Výstupní napětí U_{DC} pulzního usměrňovače je filtrováno kondenzátorem C. Napětí U_{DC} je stabilizováno pomocí zpětnovazební regulace. Zpětnovazební regulační smyčka napětí U_{DC} pracuje s lineárním PID regulátorem. Na výstupu tohoto regulátoru je generována žádaná hodnota točivého momentu, kterým PMSG zatěžuje spalovací motor.

Uvedená struktura vyžaduje měření proudů ve dvou fázích alternátoru a měření okamžitého úhlové natočení rotoru alternátoru. Výstupní člen regulační struktury generuje řídicí pulsy pro tranzistory pulzního usměrňovače. Regulace napětí U_{DC} pracuje tak, že při požadavku na zvýšení napětí (kladná regulační odchylka) se zvýší moment, tím i výkon alternátoru. Výstupní výkon P_R pulzního usměrňovače přechází jednak do zátěže jako výkon P_{DC} a jednak do filtračního kondenzátoru C jako výkon P_C . Tím se kondenzátor dobije a dojde ke zvýšení jeho napětí. Stabilizace napětí U_{DC} regulační smyčkou umožňuje udržovat konstantní napětí při proměnných otáčkách a proměnném indukovaném napětí alternátoru. Struktura regulace momentu alternátoru ve spojení s měřením okamžitého úhlového

natočení jeho rotoru zabezpečí přirozené synchronizování pulzního usměrňovače při proměnné frekvenci a efektivní hodnotě napětí alternátoru.

2.6.3 REGULACE SOUSTAVY PMSG - PULZNÍ USMĚRŇOVAČ

Klíčovou součástí řídicí struktury (Obr. 2.27) je podřazená úroveň zabezpečující regulaci momentu PMSG. Ve struktuře regulace napětí U_{DC} je moment PMSG akční veličinou, která je nastavována na takovou hodnotu, aby bylo napětí U_{DC} stabilizováno na požadované hodnotě v kontextu s aktuálními otáčkami spalovacího motoru a PMSG a v kontextu s aktuálním elektrickým odběrem ve stejnosměrné sběrnici hybridního vozidla.

Regulace momentu PMSG je založena na principu vektorové regulace. V následujících odstavcích budou stručně uvedeny základní principy této metody.

Struktura vektorového řízení synchronního stroje pracuje v transformované soustavě souřadnic d, q, kdy osa d je zároveň osou rotoru a definuje polohu spřaženého magnetického toku permanentních magnetů ve stroji Ψ_f .

Pro moment synchronního stroje platí, při zobrazení základních veličin v souřadnicové soustavě d, q, základní vztah [55], [56]:

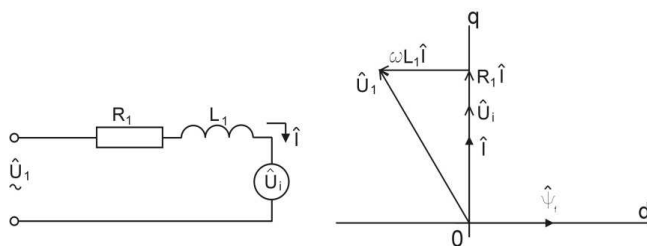
$$M = \frac{3}{2} p_p (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d) \quad (13)$$

V této rovnici je p_p počet pólových dvojic stroje a Ψ_d, Ψ_q, i_d, i_q jsou složky spřaženého magnetického toku a proudu statoru v osách d, q.

V základním módu je složka proudu i_d , zadána nulová, $i_d^* = 0$. V tomto módu platí potom pro moment zjednodušený vztah:

$$M = \frac{3}{2} p_p \Psi_f i_q = \frac{3}{2} p_p \Psi_f I \quad (14)$$

Ve vztahu (14) je Ψ_f je spřažený magnetický tok permanentních magnetů a I je efektivní hodnota proudu fáze statoru. Situaci, kdy je synchronní stroj řízen s $i_d = 0$, odpovídá fázorový diagram na Obr. 2.28.

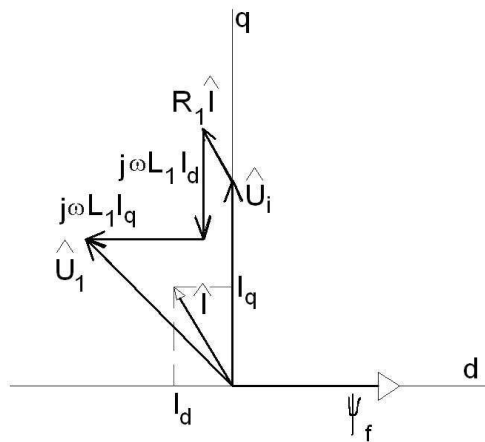


Obr. 2.28 Fázorový diagram synchronního stroje při momentové regulaci

Ve schématu na Obr. 2.28 je U_1 svorkové napájecí napětí statorového vinutí, R_1 a L_1 jsou odpor a indukčnost statorového vinutí a U_i je indukované napětí.

V oblasti vyšších otáček se u synchronních strojů s permanentními magnety používá nepřímé odbuzování, tj. zeslabování magnetického toku permanentních magnetů pomocí magnetizační složky i_d statorového proudu. Tento režim umožňuje provoz stroje

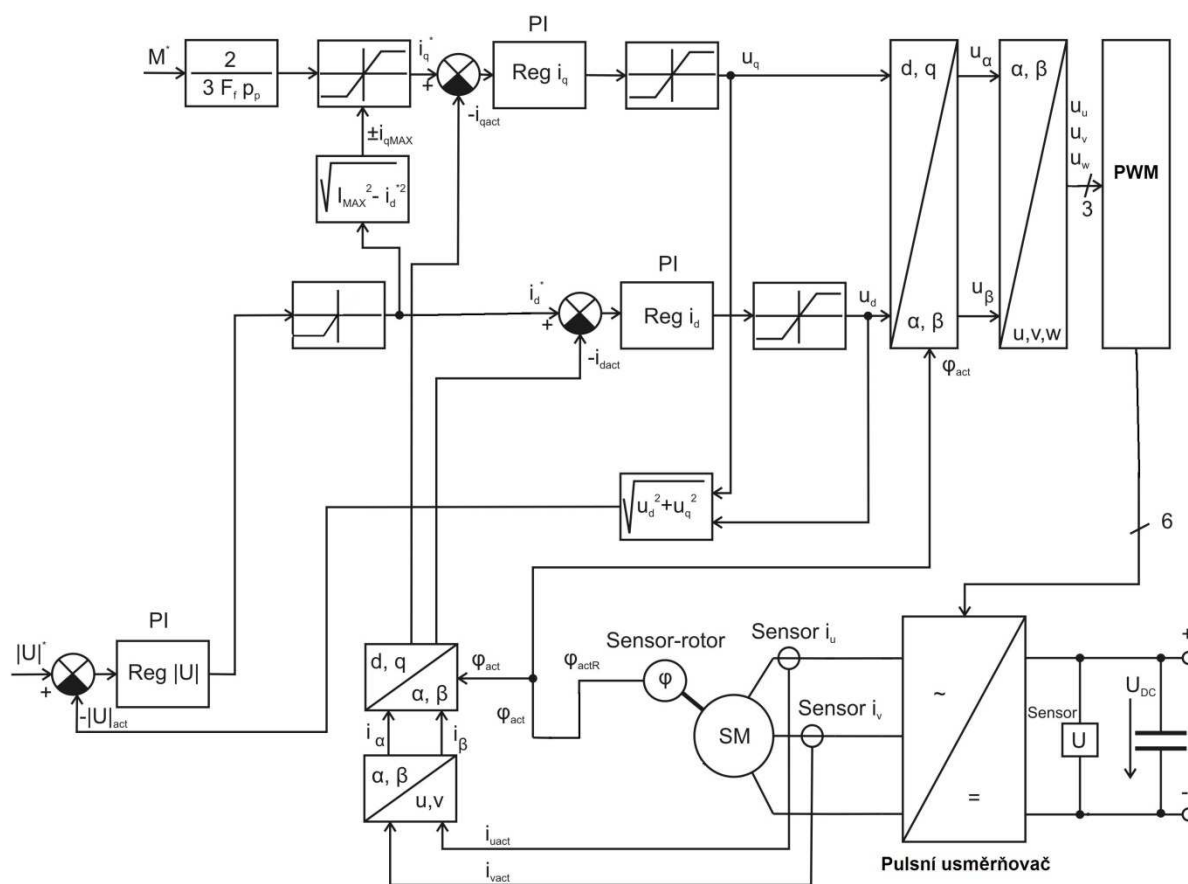
při svorkovém napětí se stálou efektivní hodnotou při rostoucích otáčkách, avšak při klesajícím momentu. Fázorový diagram synchronního stroje v režimu odbuzování je na Obr. 2.29.



Obr. 2.29 Fázorový diagram synchronního stroje při momentové regulaci při odbuzování

V případě řízení generátoru na principu vektorové regulace momentu synchronního stroje se předpokládá provoz pulzního usměrňovače ve zvyšovacím režimu napětí, tedy bez odbuzování. Vzhledem ke skutečnosti, že rozsah otáček spalovacího motoru a generátoru je limitován a vzhledem k poklesu momentu stroje v režimu odbuzování není optimální navrhovat generátor a související komponenty pro trvalý chod generátoru v režimu odbuzování. To znamená, že minimální provozní hladina napětí U_{DC} by měla být vyšší, než amplituda svorkového napětí generátoru při maximálních provozních otáčkách. I v případě, že se u synchronního generátoru režim odbuzování v běžném provozu

nepředpokládá, je nutné, aby byl algoritmus odbuzování v řídicí struktuře implementován. K tomu existují dva hlavní důvody: zachování funkce generátoru a pulzního usměrňovače při neočekávaném poklesu napětí U_{DC} stejnosměrné napájecí sběrnice a start funkce soustavy generátor – pulzní usměrňovač. Struktura regulace momentu synchronního generátoru je na Obr. 2.30 včetně algoritmu pro odbuzování.



Obr. 2.30 Regulace momentu PMSG

Žádaná hodnota momentu je podle vztahu (14) přepočtena na žádanou hodnotu momentotvorné složky proudu statoru i_q^* . Po odečtení skutečné hodnoty i_q vstupuje regulační odchylka do PI regulátoru této veličiny. V režimu s plným magnetickým tokem je žádaná hodnota magnetizační složky proudu i_d^* nulová. Výstupy regulátorů složek proudů statoru jsou požadované složky statorového napětí u_d , u_q a v transformačních blocích jsou přepočteny na zadání fázových napětí, která jsou zavedena na vstup šířkově pulsního modulátoru (PWM). Skutečné hodnoty proudů ve fázích i_u a i_v jsou přepočteny v transformačních blocích na skutečné hodnoty složek i_d , i_q .

Pro účely regulace momentu generátoru jsou měřeny dva proudy ve fázích i_u a i_v , okamžité úhlové natočení rotoru φ a napětí U_{DC} na výstupu pulsního usměrňovače. Úhel φ může být principiálně získáván i bezsensorově, výpočtem. Údaj napětí U_{DC} je v regulační struktuře využit ke korekci hodnot u_d , u_q v závislosti na kolísání hodnoty U_{DC} .

V režimu odbuzování se uplatní regulátor modulu prostorového vektoru statorového napětí generovaného šířkově-pulzním modulátorem a pulzním usměrňovačem, $|U|$ v Obr. 2.30. Žádaná hodnota modulu napětí je velmi blízká maximální hodnotě, dané implementací šířkově-pulzního modulátoru.

Univerzita Pardubice Dopravní fakulta Jana Pernera	Dizertační práce	39
---	------------------	----

Skutečná hodnota modulu napětí je určena podle Pythagorovy věty ze složek u_d , u_q :

$$|U| = \sqrt{u_d^2 + u_q^2} \quad (15)$$

Regulátor odbuzování má převážně integrační charakter. Výstupem tohoto regulátoru je žádaná magnetizační složka statorového proudu i_d^* , která se uplatní jen v případě její záporné polarity, kdy je zeslabován magnetický tok v závislosti na okamžité hodnotě otáček ω_m a napětí U_{DC} tak, aby byl modul napětí udržován na požadované hodnotě.

Specifickým procesem je start funkce soustavy PMSG – pulzní usměrňovač a uvedení pulzního usměrňovače do režimu zvyšování napětí. Ve výchozí situaci je předpokládán stav, kdy je generátor poháněn spalovacím motorem, ve statorovém vinutí generátoru je indukováno napětí. Toto napětí je usměrněno třífázovým můstkovým usměrňovačem tvořeným zpětnými diodami pulzního usměrňovače. Napětí je filtrováno výstupním kondenzátorem pulzního usměrňovače. Napětí U_{DC} tohoto kondenzátoru je, až na malé úbytky na polovodičových prvcích, rovno amplitudě svorkového sdruženého napětí generátoru ($U_{DC} = \sqrt{2} \cdot U_{1sdruž}$). Před odblokováním činnosti vektorové regulace momentu generátoru je tedy rovnováha mezi napětím generátoru a napětím U_{DC} . Po odblokování regulace pracuje synchronní generátor v režimu odbuzování a energie generátoru je dodávána do kondenzátoru na výstupu pulzního usměrňovače. Tím dochází ke vzrůstu napětí U_{DC} . Při vzrůstu napětí U_{DC} se snižuje velikost záporné magnetizační složky proudu statoru generátoru i_d a pulzní usměrňovač přechází do režimu zvyšování napětí. Napájení kondenzátoru je řízeno regulátorem RU_{DC} na Obr. 2.27 a je ukončeno po dosažení žádané hodnoty U_{DC} . Je vhodné, aby v tomto stavu již generátor nepracoval v režimu odbuzování.

Detailnější informace o principu vektorového řízení momentu synchronního stroje lze nalézt například v [57], [58], [59], [60], [61], [62].

3. ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ

3.1 OPTIMÁLNÍ ŘÍZENÍ SM

Kritériem pro optimální provoz spalovacího motoru může být minimalizace spotřeby paliva při všech hodnotách odebíraného výkonu, aby spalovací motor pracoval v režimu s co nejvyšší účinností. Jiným kritériem je např. minimalizace produkce emisí.

V obou případech se vychází z podkladů k SM dodaných výrobcem:

- úplná charakteristika konkrétního motoru, ve které je zanesena měrná spotřeba paliva v závislosti na otáčkách a momentu motoru
- vnější momentová a výkonová charakteristika motoru
- charakteristiky produkce emisí CO, HC, NO_x a pevných částic PM v závislosti na otáčkách a momentu motoru, poslední dvě složky ze jmenovaných (NO_x a PM) jsou velmi sledované především u vznětových motorů

Úplné charakteristiky spalovacích motorů určené měřením se většinou získávají od výrobců velmi obtížně. Stejně tak charakteristiky emisí. Získání úplné charakteristiky motoru vyžaduje provedení velkého počtu měření a následně náročné vyhodnocení výsledků měření.

Z důvodu úzké vazby této dizertační práce na obchodní projekt, nejsou některé údaje spalovacího motoru záměrně uváděny nebo jsou uváděny pouze v relativním měřítku. Ze stejného důvodu není možné uvést přesný typ SM, ze kterého pocházejí uváděné charakteristiky.

Výchozí podmínky a předpoklady pro algoritmus optimálního řízení SM

Při tvorbě algoritmu se musely zohlednit následující poznatky a požadavky:

1. Max. otáčky SM byly stanoveny na 1600 1/min kvůli správné funkci pulzního usměrňovače.

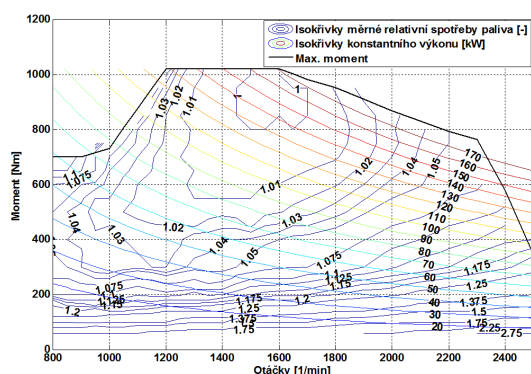
Toto omezení vyplynulo ze špatného sladění parametrů el. generátoru a spalovacího motoru reálného vozidla. Nad otáčkami 1600 1/min již nebylo možné řídit usměrňované napětí pulzního usměrňovače, který přestal pracovat ve zvyšujícím režimu. Tím nebude výkon SM maximálně využit (na 93 % max. výkonu motoru). Při otáčkách 1600 1/min poskytuje SM výkon „pouze“ 171 kW místo 184 kW při otáčkách 2300 1/min.

2. Předpokládá se otáčková regulace spalovacího motoru.
3. Provoz motoru je optimalizován s ohledem na minimální spotřebu paliva – tj. otáčky motoru se nastavují dle požadovaného výkonu podle optimální zatěžovací charakteristiky.
4. Použité údaje a charakteristiky k SM:
 - Úplná charakteristika motoru
 - Průběh maximálního momentu a výkonu dle otáček – vnější otáčková charakteristika
 - Úplné charakteristiky produkce emisí NO_x a PM (HC a CO nejsou k dispozici).

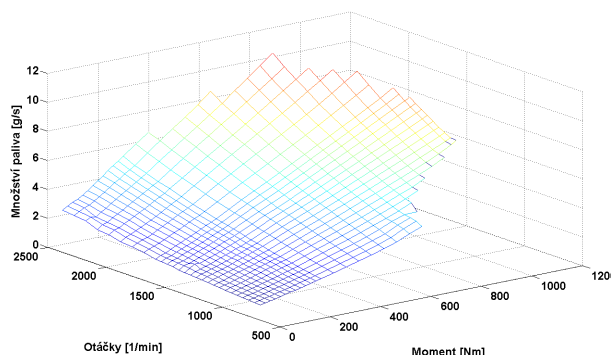
5. Dynamika SM – předpokládá se, že regulátor otáček SM má špatnou dynamiku. Tudíž je vhodné provozovat SM nejlépe při ustálených otáčkách nebo pouze s pomalými přechody mezi otáčkovými body.
6. Neznalost celkové strategie řízení hybridního pohonu autobusu jako celku.
7. Vstupem algoritmu je:
 - Požadovaný výkon na hřídeli SM.
 - Povel pro zapnutí nebo vypnutí SM.
8. Výstupem algoritmu je:
 - Optimální hodnota otáček odpovídající požadovanému výkonu. (Tato hodnota bude vstupovat do otáčkového regulátoru SM.)
 - Informace o výkonu, kterým lze v aktuální chvíli zatěžovat SM.

3.1.1 ÚPLNÁ CHARAKTERISTIKA SM

Je základním podkladem pro optimalizaci provozu SM v bodech s nejnižší měrnou spotřebou paliva [g/kWh], respektive vysokou účinností. Na Obr. 3.1 je znázorněna úplná charakteristika použitého SM. Isokřivky v charakteristice znázorňují oblasti s konstantní měrnou spotřebou paliva. Hodnoty měrné spotřeby paliva jsou v charakteristice vyjádřeny relativně vůči bodu s nejnižší měrnou spotřebou paliva.



Obr. 3.1 Úplná charakteristika spalovacího motoru

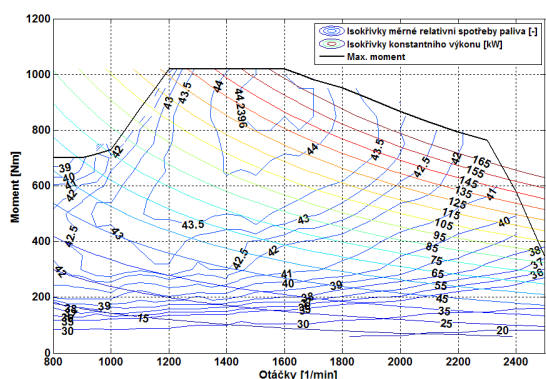


Obr. 3.2 Palivová mapa – spotřeba paliva v [g/s]

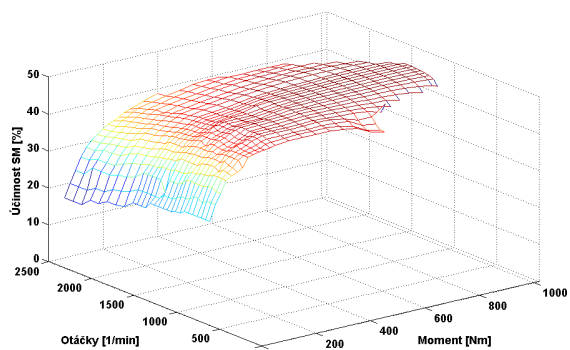
Na základě znalosti měrné spotřeby paliva [g/kWh] v bodě, kdy je relativní měrná spotřeba paliva rovna jedné, byl proveden převod z relativních jednotek měrné spotřeby paliva na absolutní, tj. z [-] na [g/kWh].

Na základě této informace již mohla být zkonstruována úplná charakteristika motoru v jednotkách [g/kWh] a mohla být sestrojena palivová mapa $\dot{m}_f = f(n, M_e)$ v jednotkách průtoku [g/s], která je základním prvkem v modelu SM.

Charakteristika účinnosti odpovídající úplné charakteristice SM je uvedena na Obr. 3.3 a Obr. 3.4.



Obr. 3.3 Účinnost SM ve 2D



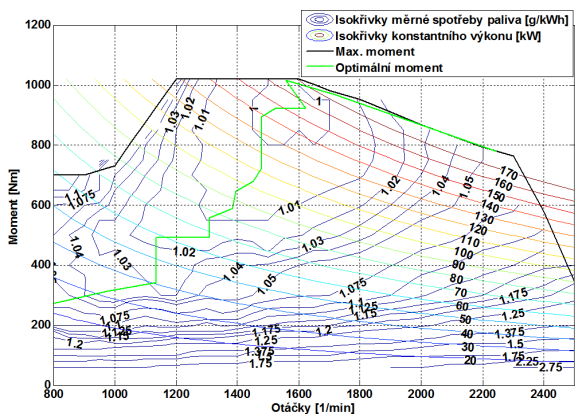
Obr. 3.4 Účinnost SM ve 3D

3.1.2 OPTIMÁLNÍ ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTIKA

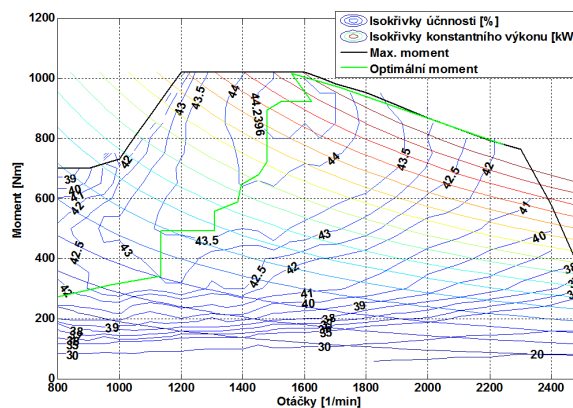
Jako kritérium pro optimální provoz SM byla zvolena minimalizace měrné spotřeby paliva při všech hodnotách odebíraného výkonu.

Spalovací motor bude řídit své otáčky s ohledem na tento požadovaný výkon a to tím způsobem, aby byla dosažena minimální měrná spotřeba paliva, tj. aby spalovací motor pracoval v režimu s co nejvyšší účinností.

Křivka optimální zatěžovací charakteristiky vznikne jako spojnice optimálních pracovních bodů, ve kterých je dosaženo minimální měrné spotřeby paliva. Na každé hyperbole konstantního výkonu lze najít optimální pracovní bod, ve kterém motor realizuje daný výkon s minimální měrnou spotřebou paliva. Spojnice těchto bodů je optimální zatěžovací charakteristika (Obr. 3.5). V dalším textu bude pro optimální zatěžovací charakteristiku použit termín „optimální trajektorie“.



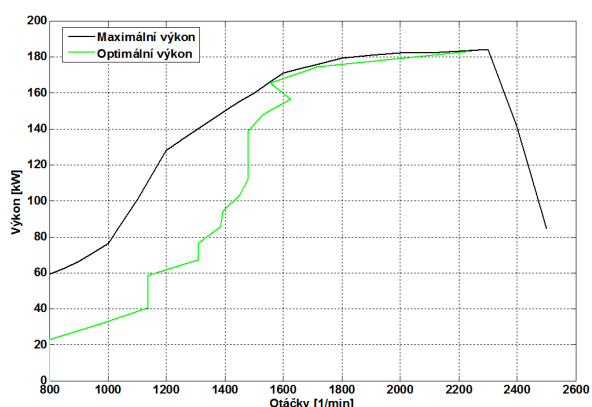
Obr. 3.5 Optimální trajektorie momentu v úplné charakteristice SM



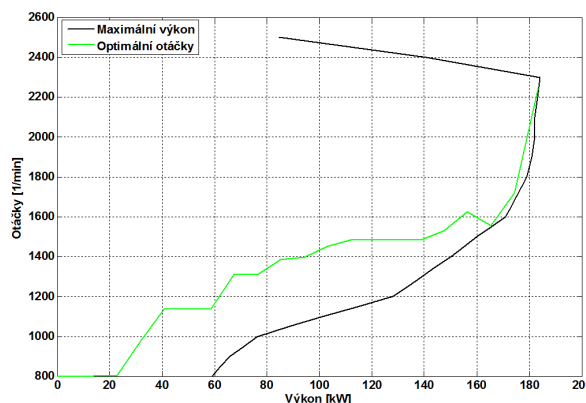
Obr. 3.6 Optimální trajektorie momentu v charakteristice účinnosti SM

Z Obr. 3.5 a Obr. 3.6 vyplývá, že nejefektivnější je motor provozovat v oblasti středních otáček a maximálního momentu.

Vynásobením hodnoty momentu a otáček v každém bodě optimální zatěžovací charakteristiky lze sestavit optimální závislost mezi odebíraným výkonem a otáčkami (Obr. 3.8).



Obr. 3.7 Průběh optimálního výkonu v závislosti na otáčkách motoru



Obr. 3.8 Průběh optimálních otáček v závislosti na výkonu motoru

Pozn.: Účinnost v každém bodě mapy na Obr. 3.6 byla vypočtena z úplné charakteristiky motoru jako:

$$\eta = \frac{P_e(M_e, n)}{\dot{m}_f \cdot H_u} \cdot 100 \quad [\%] \quad (16)$$

Kde: P_e – efektivní výkon motoru v daném pracovním bodě [W],

M_e – efektivní moment motoru [Nm],

n – otáčky motoru [1/min],

\dot{m}_f - spotřeba paliva [kg/s] v daném pracovním bodě,

H_u - (dolní) výhřevnost nafty $42 \cdot 10^6$ J/kg.

3.1.3 SCHODOVITÁ OPTIMÁLNÍ TRAJEKTORIE

Z tvaru průběhu nalezené optimální trajektorie je patrné, že zvyšujícímu se výkonu náleží vždy vyšší otáčky motoru. To znamená, že při teoreticky neustále se měnícím požadavku na odebraný výkon ze SM bude docházet k odpovídající změně otáček. Neustálé urychlování SM do vyšších otáček způsobuje odchýlení od optimální zatěžovací charakteristiky díky složce dynamického výkonu a tedy provoz v neoptimálních pracovních bodech.

Proto je vhodné, aby SM pracoval co nejčastěji při konstantních otáčkách.

Dalším faktorem, který je vhodné uvažovat, je předpokládaná horší dynamika otáčkového regulátoru SM vůči momentové regulaci SM (moderní vznětové motory vybavené elektronickým systémem řízení jsou interně řízeny momentově). SM je v pohonu řízen otáčkově, el. generátor momentově.

Provoz SM při (co nejčastěji) konstantních otáčkách může být zajištěn následujícími způsoby:

1. nadřazený systém řízení bude po SM žádat konstantní výkon,
2. úpravou optimální trajektorie tak, aby motor pracoval při konstantních otáčkách i při kolísající hodnotě požadovaného výkonu.

Předpokládané výhody způsobu řízení SM dle bodu 2:

- rychlejší odezva na změnu zatížení (odpadá nutnost plynulé změny otáček s výkonem)
- není třeba urychlovat motor do vyšších otáček – úspora paliva, menší odchylky od optimální trajektorie způsobené dynamickým momentem/výkonem nutným pro urychlení motoru

Předpokládané nevýhody způsobu řízení SM dle bodu 2:

- upravená optimální trajektorie již nevede body, ve kterých je měrná spotřeba paliva opravdu nejmenší → teoretický nárůst spotřeby paliva.

Jedním z předmětů analýz provedených v této práci je ověření, zda je výhodnější SM provozovat podle optimální trajektorie odvozené z úplné charakteristiky motoru (Obr. 3.8) nebo způsobem uvedeným v bodu 2.

Optimální trajektorie byla upravena tak, že byl celkový výkon SM rozdělen do několika intervalů a v každém z nich SM pracuje při určitých konstantních otáčkách. Takto upravená optimální trajektorie byla nazvána jako „schodovitá trajektorie“. Původní optimální trajektorie, zjištěná z úplné charakteristiky motoru, je dále nazývána jako „spojitá optimální trajektorie“, vzhledem k jejímu tvaru.

Schodovitá trajektorie

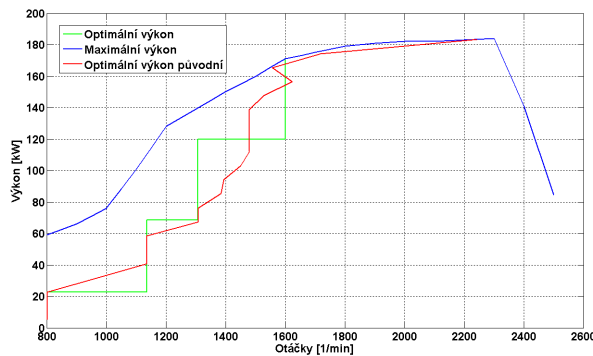
Původní optimální trajektorie byla nahrazena schodovitou křivkou. Spalovací motor bude dle požadovaného výkonu pracovat na jedné ze 4 hodnot konstantních otáček. Dle velikosti požadovaného výkonu bude mezi nimi přecházet. Těmto 4 hodnotám otáček odpovídají 4 výkonové intervaly.

Okamžiky přechodů mezi otáčkami a počet intervalů byl volen nejprve „ručně“ s ohledem na tvar původní optimální trajektorie, aby nová křivka co nejčastěji procházela body s nejnižší měrnou spotřebou paliva a vzdalovala se od původní optimální trajektorie co nejméně. Tato schodovitá trajektorie byla dále optimalizována (kapitola 3.1.4). Schodovitá optimální trajektorie byla oříznuta na otáčkách 1600 1/min z důvodů uvedených v kapitole 3.1.

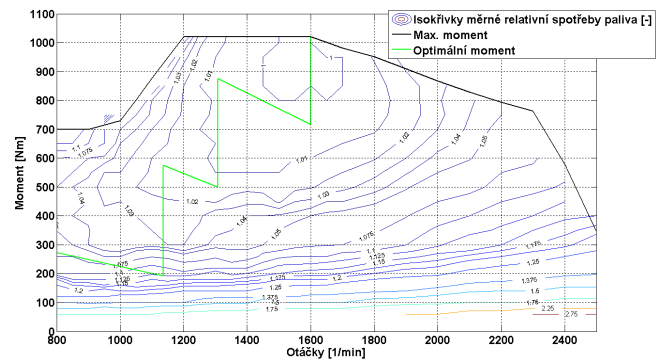
Tab. 3.1 Schodovitá trajektorie

Rozsah výkonu [kW]	Otáčky [1/min]
0 – 22,850	800
22,851 – 68,410	1136
68,411 – 120,000	1308
120,001 – 171,000	1600

SM pracuje při otáčkách 1600 1/min již s téměř maximálním výkonem (171 kW @ 1600 1/min vůči 184 kW @ 2300 1/min).



Obr. 3.9 Porovnání původní a schodovité optimální trajektorie

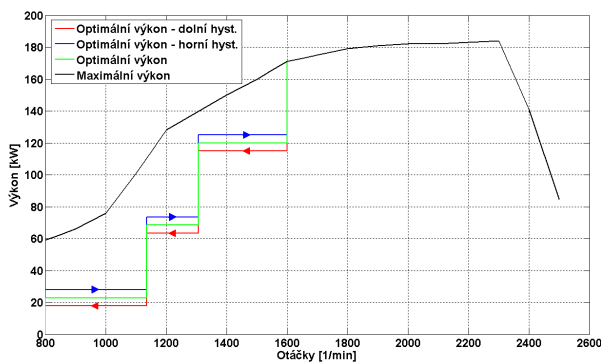


Obr. 3.10 Odpovídající průběh momentu schodovité optimální trajektorie v úplné charakteristice SM

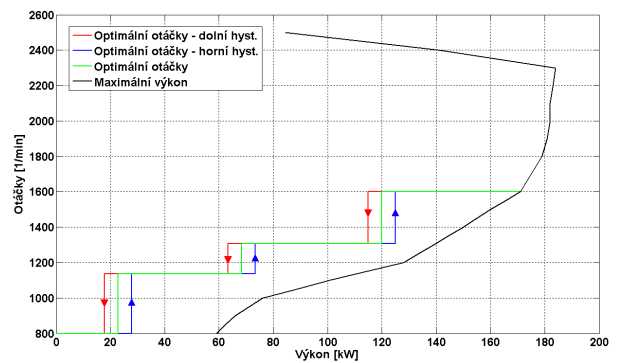
Vzhledem k předpokládanému kolísání požadovaného výkonu je nutné zamezit opakovaným přechodům na jiné otáčky, pokud se hodnota žádaného výkonu bude pohybovat blízko hranice přechodu. Proto je nutné zavést hysterzezi.

Hodnotu hysterzeze výkonu na jednotlivých hranicích přechodu mezi otáčkami je nutné při praktické implementaci doladit dle zvlnění požadovaného výkonu a také s ohledem na dostatečný odstup trajektorie od křivky max. výkonu (bude vysvětleno v dalších kapitolách). Pro minimalizaci spotřeby paliva je vhodné, aby pásmo hysterzeze bylo co nejužší, tj. aby se schodovitá optimální trajektorie s hysterzezi blížila schodovité optimální trajektorii bez hysterzeze.

Vliv velikosti hysterzeze na spotřebu paliva bude předmětem dalších simulací.



Obr. 3.11 Schodovitá trajektorie s hysterzezi 10 kW – průběh optimálního výkonu dle otáček



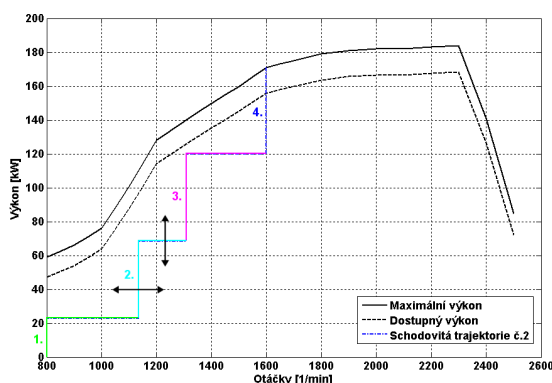
Obr. 3.12 Schodovitá trajektorie s hysterzezi 10 kW – průběh optimálních otáček dle výkonu

Hysterzeze u jednotlivých přechodů může být různá nebo pro zachování jednoduchosti v prvotních reálných testech stejná.

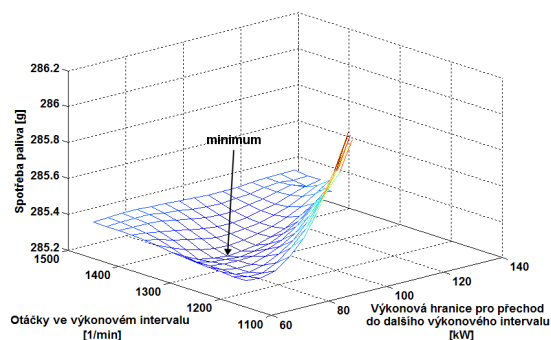
3.1.4 POUŽITÝ ZPŮSOB OPTIMALIZACE

Předmětem optimalizace je schodovitá optimální trajektorie uvedená v předchozí kapitole. V rámci práce bylo vytvořeno několik typů schodovitých trajektorií, které se navzájem lišily počtem výkonových intervalů a jejich šířkami, respektive použitou hodnotou otáček ve výkonových intervalech.

Schodovité trajektorie byly optimalizovány postupně v jednotlivých intervalech výkonu. V každém intervalu byla hledána taková kombinace šířky výkonového intervalu a hodnoty otáček, při nichž došlo ke snížení celkové spotřeby paliva [g] za jízdní cyklus (Obr. 3.13 a Obr. 3.14). Opakovanými simulacemi s různým nastavením šířek intervalů výkonu a hodnoty otáček v těchto intervalech byla postupně nalezena optimální trajektorie, u níž bylo dosaženo nejnižší spotřeby paliva za jízdní cyklus.



Obr. 3.13 Princip optimalizace (postupně po intervalech)



Obr. 3.14 Nalezení optimálních otáček a šířky intervalu výkonu v jednom z intervalů výkonu

Je zřejmé, že takto prováděná optimalizace v sobě zahrnuje i dynamické chování SM během jízdního cyklu, tudíž se výsledná zoptimalizovaná trajektorie bude lišit od trajektorie spojitě optimalizované staticky, tj. bez uvažování dynamického chování SM (spojitá trajektorie byla nalezena jako spojnice minim měrných spotřeb v úplné charakteristice SM).

Dynamicky optimalizovaná schodovitá trajektorie je platná pouze pro jeden simulační scénář. Pokud dojde ke změně jízdního cyklu nebo ke změně parametrů vozidla, jinému nastavení regulátoru otáček nebo otáčkové rampy, změně hystereze, dynamické rezervy výkonu apod., je zřejmé, že takto vypočtená optimální trajektorie již nebude nadále optimální neboť se změní rozložení pracovních bodů SM. Velikost vlivu některých zde uvedených faktorů je předmětem simulačních scénářů v této práci.

3.2 SIMULAČNÍ SOFTWARE

Pro simulaci provozu spalovacího motoru s připojeným el. generátorem byl použit software Matlab/Simulink. Celý simulační model se skládá z dílčích bloků nebo modelů, které jsou mezi sebou propojeny. Modely jsou sestaveny ze základních funkčních bloků standardní knihovny Simulink.

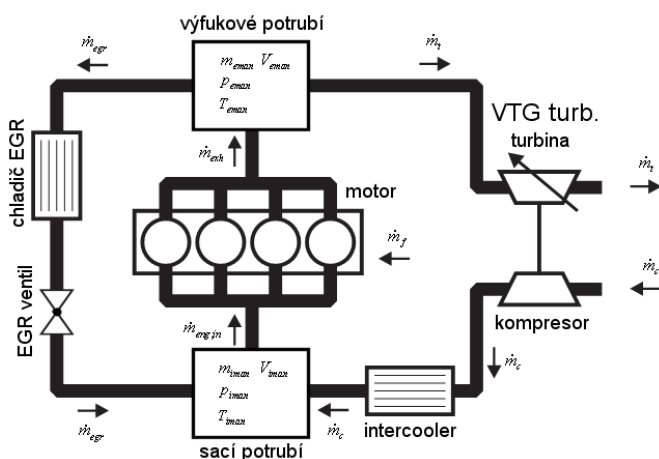
Celkový simulační model se skládá z modelu spalovacího motoru, modelu el. generátoru, optimalizační jednotky řízení spalovacího motoru a podpůrných bloků. Pro parametrizaci modelů jsou vytvořeny Matlab skripty, které se spouští automaticky po otevření simulačního modelu. Dále byly vytvořeny skripty pro automatické vyhodnocení výsledků simulace po jejím proběhnutí.

3.3 MODEL SM

Model spalovacího motoru je kvazistacionární „mean-value“ model. Byl sestaven na základě fyzikální teorie mechaniky a dynamiky kapalin a plynů a základních termodynamických procesů v kombinaci s údaji, naměřenými na reálném motoru, v tabulkové formě.

Kompletní model SM se skládá z těchto bloků:

- Mezichladič stlačeného vzduchu
- Sací a výfukové potrubí
- Turbodmychadlo (turbína + kompresor)
- Recirkulace spalin (EGR)
- Výpočet kroutícího momentu a otáček motoru
- Výpočet emisí a spotřeby paliva



Obr. 3.15 Blokové schéma přepřítovaného vznětového motoru

zpět do sání přes systém EGR. Směs spalin a čerstvého vzduchu je nasáta do válců, kde dojde k procesu spalování. Na opačné straně procházejí výfukové plyny výfukovým potrubím motoru, odkud je jejich menší část vedena zpět skrze chladič systému EGR na stranu sání. Zbylá část prochází turbínou turbodmychadla (VTG – turbodmychadlo s proměnnou geometrií), která pohání kompresor. Výfukové

Čerstvý vzduch, který do systému sání vstupuje přes vzduchový filtr (není na obrázku ani není modelován), je stlačován kompresorem turbodmychadla. Vlivem stlačení stoupá tlak a teplota vzduchu. Zvýšení teploty je nežádoucí, proto vzduch dále prochází přes mezichladič, kde dojde k jeho ochlazení. Na rozdíl od zážehového motoru nepotřebuje vznětový motor škrtkovací klapku, takže vzduch dále prochází přímo do sacího potrubí motoru, kde může být smíchán se spalinami přivedenými

plyny pak odchází dále do systému čištění spalin a tlumičem výfuku (nejsou v modelu implementovány) ven do ovzduší.

Model zde uvedený je platný pro přepínaný vznětový motor vybavený turbodmychadlem typu VTG, mezichladičem stlačeného vzduchu a EGR systémem s chladičem spalin.

Tento úplný model je však velmi náročný na parametrizaci, vyžaduje velké množství charakteristik, které musí poskytnout výrobce motoru nebo musejí být náročně změřeny. Z tohoto důvodu nebyl plný model implementován. Místo něj byla vytvořena zjednodušená varianta, ve které bylo vynecháno turbodmychadlo, výfukové potrubí, chladič EGR a intercooler.

Zjednodušený model SM, který byl vytvořen, se skládá z těchto bloků:

- Sací potrubí
- Recirkulace spalin (EGR)
- Výpočet kroutícího momentu a otáček motoru
- Výpočet emisí a spotřeby paliva

Tab. 3.2 Parametry použitého spalovacího motoru

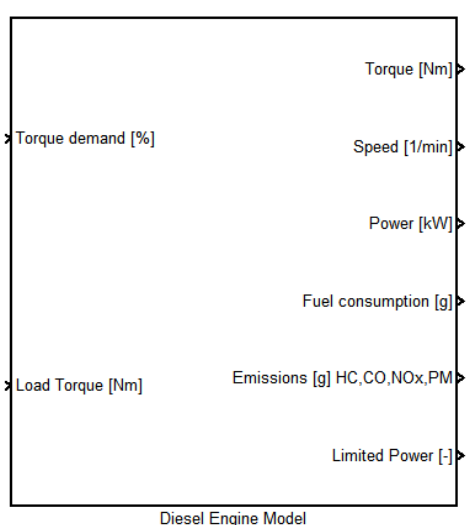
Motor	A	B
Objem	6,7 l	7,3 l
Max. moment	1020 Nm při 1200 až 1600 1/min	723 Nm při 1700 1/min
Max. výkon	184 kW při 2300 1/min	170 kW při 2700 1/min
Počet válců	6 v řadě	6 v řadě
Palivo	Motorová nafta	Motorová nafta
Systém vstřikování	Common Rail	Common Rail
Turbodmychadlo	VTG	VTG
Emisní norma	EEV	EPA CARB for heavy duty engines, 1998 (odpovídá cca EURO III)

Model byl naparametrován údaji získanými ze dvou vznětových přepínaných motorů. Důvodem použití dvou sad parametrů byla neúplnost každé sady, jejich sloučením vznikla potřebná sada parametrů pro model. Parametry motorů jsou uvedeny v Tab. 3.2. Z motoru A je v modelu použita pouze úplná charakteristika motoru. Ostatní parametry a mapy, které model obsahuje, jsou použity z motoru B. Ty byly pouze vyškálovány s ohledem na vnější otáčkovou charakteristiku spalovacího motoru A.

V modelu jsou z reálných motorů použity tyto charakteristiky:

- úplná charakteristika motoru
- vnější otáčková charakteristika (průběh max. momentu a výkonu)
- mapa AFR (směšovací poměr vzduch/palivo)
- mapa EGR (recirkulace spalin)
- mapa množství nasávaného vzduchu
- mapa produkce emisí NO_x, PM

Detailní popis všech částí modelu by přesáhl rozsah této práce, proto jsou v této kapitole uvedeny pouze některé vybrané části. Kompletní popis modelu SM je uveden v příloze č. 1.



Obr. 3.16 Vytvořený model vznětového motoru

Vstupy

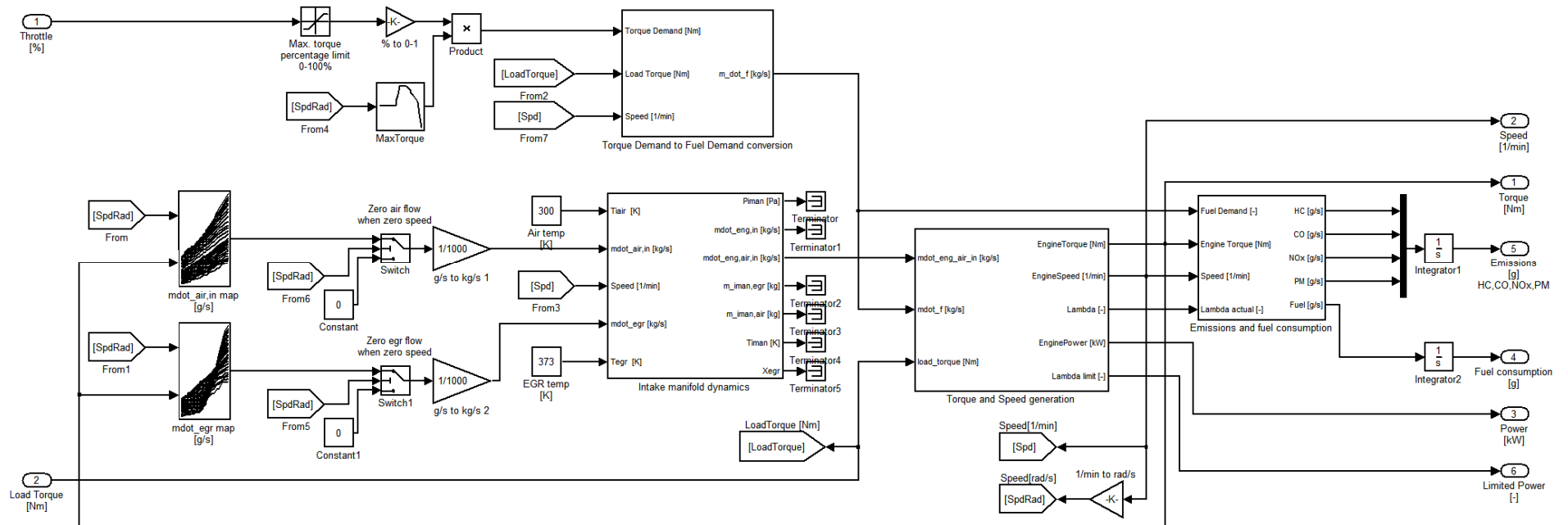
- Torque demand [%] – žádaná hodnota efektivního momentu motoru, vztažena vůči max. momentu při daných otáčkách
- Load Torque [Nm] – zatěžovací moment motoru

Výstupy

- Torque [Nm] – efektivní moment vyvinutý motorem
- Speed [1/min] – otáčky motoru
- Power [kW] – efektivní výkon vyvinutý motorem
- Fuel consumption [g] – kumulovaná spotřeba paliva
- Emissions [g] HC, CO, NO_x, PM – vektor kumulované produkce emisních složek
- Limited Power [-] – dvohodnotový výstup (0/1), informace o dočasném omezení výkonu SM v přechodovém stavu (0 – výkon neomezen, 1 – výkon omezen)

Výstup „Limited Power“ informuje o dočasném omezení výkonu SM v přechodových stavech (při urychlování motoru). Při prudkém „přidání plynu“ může dojít k omezení dávky paliva s ohledem na kouřivost. To má za následek nižší moment/výkon motoru než odpovídá maximálnímu momentu/výkonu při daných otáčkách v ustáleném stavu. Vyvedení této informace z modelu SM se ukázalo jako nezbytné pro správnou funkci modelu optimalizační jednotky řízení SM, aby byla schopna správně určovat dostupný výkon SM v každém okamžiku.

Moment setrvačnosti je v modelu nastaven na hodnotu 2 kgm², přičemž na samotný motor připadá 0,48 kgm² (vyčteno z datasheetu SM), na připojený el. generátor 1,52 kgm². Hodnota momentu setrvačnosti el. generátoru byla odhadnuta na základě katalogových údajů el. točivých strojů podobných parametrů.



Obr. 3.17 Vnitřní struktura modelu SM

Model se skládá ze čtyřech dílčích bloků:

- Blok přepočtu žádaného poměrného momentu na dávku paliva (*Torque Demand to Fuel Demand conversion*)
- Blok sacího potrubí (*Intake manifold dynamics*)
- Blok výpočtu momentu a otáček (*Torque and Speed generation*)
- Blok výpočtu spotřeby paliva a produkce emisí (*Emissions and fuel consumption*)

Univerzita Pardubice Dopravní fakulta Jana Pernera	Dizertační práce	51
---	------------------	----

Stručný popis funkce modelu

Vstupem do modelu je žádaná hodnota momentu („Throttle [%]“) udaná v procentech maximálního momentu při aktuálních otáčkách. Na tento vstup se dá pohlížet jako na „plynový pedál“. Vstup je ošetřen limitací na rozsah 0 až 100 %. Vypočtený požadovaný moment je společně s aktuálními otáčkami zaveden do bloku *Torque Demand to Fuel Demand conversion*. V něm dojde k převodu z poměrného zadání momentu na dávku paliva [g/s] pomocí 2-D look-up tabulky, která obsahuje palivovou mapu motoru $\dot{m}_f = f(n, M_e)$. Zároveň je zde umístěna logika pro vypínání dávky paliva při aktivní motorové brzdě, při nedosažení startovacích otáček motoru a při nulovém žádaném poměrném momentu. Odpovídající dávka paliva je dále vedena do bloku výpočtu momentu a otáček motoru (blok s názvem *Torque and Speed generation*). V něm je vypočten efektivní kroutící moment motoru, otáčky motoru z pohybové rovnice a další veličiny.

Množství čerstvého vzduchu nasávaného do motoru, které je také jedním ze vstupů bloku výpočtu momentu a otáček, se vypočítává v bloku sacího potrubí (*Intake manifold dynamics*). Jelikož v modelu chybí model turbodmychadla jehož jedním z výstupů je množství vzduchu proudícího do sacího potrubí (vstup „ \dot{m}_{air_in} [kg/s]“ bloku *Intake manifold dynamics*), bylo nutné získat tuto veličinu jiným způsobem. Proto je množství vzduchu proudícího do sání vyčítáno ze statické mapy v závislosti na otáčkách a momentu motoru. Tato mapa je zanesena do 2-D look-up tabulky s názvem „ \dot{m}_{air_in} map [g/s]“ (na Obr. 3.17 úplně vlevo). V cestě je zařazen přepínač, který v případě, že jsou otáčky motoru nulové, nastavuje průtok na nulovou hodnotu. Je to z důvodu rozsahu naměřených dat v mapách (nezačínají v nule otáček a momentu motoru).

Množství recirkulovaných spalin je, podobně jako množství vzduchu, také vyčítáno ze statické mapy zanesené ve 2-D look-up tabulce označené „ \dot{m}_{egr} map [g/s]“ (na Obr. 3.17 úplně vlevo dole).

Teplota nasávaného vzduchu je nastavena na konstantních 300 K, tedy cca 27°C. V případě nutnosti ji lze změnit přepsáním hodnoty konstanty připojené ke vstupu „ T_{air} [K]“ bloku *Intake manifold dynamics*. Teplota recirkulovaných spalin je také nastavena na konstantní hodnotu, a to 373 K, tedy cca 100°C, což je hodnota, kterou mohou mít výfukové plyny za EGR chladičem. Tato teplota se v praxi bude měnit, ale jelikož se v modelu nemodeluje teplota výfukových plynů, ani se nevyčítá z mapy (data nebyla dostupná), ani se nemodeluje chladič EGR, je teplota recirkulovaných spalin nastavena jako konstantní.

Ze všech výstupů bloku sacího potrubí je použit pouze jeden, a to množství vzduchu nasávaného do válců motoru (výstup „ $\dot{m}_{eng,air,in}$ [kg/s]“). Ostatní výstupy nejsou ve zjednodušeném modelu potřeba, proto jsou zakončeny terminátory.

Hlavním a téměř jediným smyslem použití bloku sacího potrubí v tomto zjednodušeném modelu je výpočet množství vzduchu nasávaného do válců motoru pro následnou korekci dávky paliva v přechodových stavech s ohledem na skutečnou hodnotu součinitele přebytku vzduchu lambda. Korekce dávky paliva se provádí v bloku výpočtu momentu a otáček.

Výstupy z bloku emisí a spotřeby paliva (*Emissions and fuel consumption*) jsou integrovány, z modelu motoru pak vystupují kumulované hodnoty spotřeby paliva [g] a vektor kumulované produkce jednotlivých emisních složek [g] v pořadí HC, CO, NO_x, PM, přičemž hodnoty HC a CO jsou nulové, protože nebyla dostupná data k motoru.

3.3.1 VÝPOČET KROUTÍCÍHO MOMENTU

Primárním úkolem spalovacího motoru je tvorba mechanického výkonu na hřídeli. Otáčky motoru jsou zde závislou proměnnou. Kroutící moment spalovacího motoru je určen především množstvím směsi ve válci, což je proměnná, kterou lze „libovolně“ měnit. Obecně je střední hodnota kroutícího momentu nelineární funkcí velkého množství proměnných, např. množství paliva, směšovacího poměru vzduch/palivo, otáčky, velikosti předstihu u benzínových motorů nebo počátku vstříku u vznětových motorů, množství recirkulovaných spalin apod.).

$$M_e = f(\dot{m}_f, \lambda, n, \varphi, x_{egr}, \dots) \quad (17)$$

Jeden možný přístup k určení kroutícího momentu motoru (viz [2] a [6]) je založen na výpočtu indikovaného momentu (případně středního indikovaného tlaku) z množství paliva dodaného do válců motoru, které určuje energii dostupnou pro proces, a účinnosti přeměny této energie na mechanickou práci. Zároveň se zde musí brát ohled na ztráty způsobené výměnou náplně válců a ztráty způsobené třením motoru. Viz rovnice (18).

$$M_e = M_i - M_f - M_p \quad (18)$$

Kde: M_e - efektivní moment na výstupní hřídeli motoru, M_i - indikovaný moment motoru, M_f - ztráty třením v motoru, M_p - ztráty výměnou náplně válců motoru.

Ztráty třením a výměnou náplně válce se většinou určují experimentálně a naměřené hodnoty se prokládají polynomiálními funkcemi, případně lze pro ztráty výměnou náplně válce využít přímo hodnoty tlaku ve výfukovém potrubí a sacím potrubí, což by byly hodnoty dostupné v plném modelu SM.

Určení indikovaného momentu (resp. výkonu) je složitější, protože závisí na řadě parametrů.

Indikovaný výkon je úměrný:

- výhřevnosti paliva H_u (cca 42 MJ/kg pro naftu),
- indikované účinnosti η_i ,
- hmotnostnímu toku paliva do motoru \dot{m}_f [kg/s],

$$P_i = \eta_i \cdot H_u \cdot \dot{m}_f \quad (19)$$

Indikovaná účinnost η_i ovšem není konstanta, nýbrž závisí na faktorech vyjmenovaných výše:

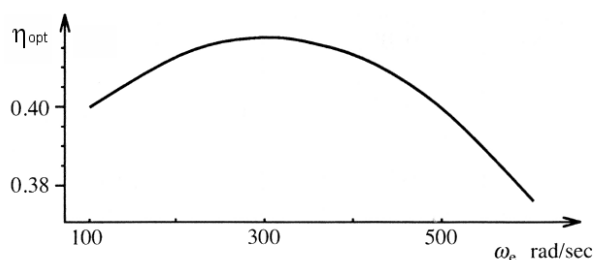
- otáčky,
- směšovací poměr vzduch/palivo (součinitel přebytku vzduchu λ),
- počátek vstříku, množství recirkulovaných spalin atd.

Jelikož je účinnost η_i závislá na této spoustě parametrů, rozděluje se do několika dílčích částí, kde každá tato část znamená vliv jednoho parametru na celkovou účinnost.

Proto lze rovnici (19) přepsat následujícím způsobem:

$$P_i = \eta_{opt}(\omega) \cdot e(\lambda) \cdot e(\varphi) \cdot e(x_{egr}) \cdot H_u \cdot \dot{m}_f \quad (20)$$

Kde: η_{opt} - indikovaná účinnost stanovená měřeními na motoru při optimálním nastavení ostatních veličin (λ , φ , x_{egr} , atd.)



Obr. 3.18 Ukázka průběhu složky indikované účinnosti závislé na otáčkách spalovacího motoru zdroj: [2]

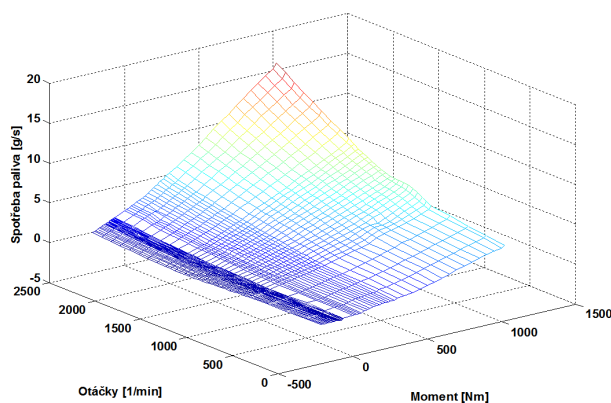
Členy $e(\cdot)$ v rovnici (20) vyjadřují vliv daného parametru na celkovou indikovanou účinnost. V literatuře a odborných člancích lze nalézt aproximace těchto členů polynomiálními funkcemi, koeficienty těchto polynomů je ovšem nutné určit regresí z naměřených dat na motoru.

Vzhledem k obtížnosti a časové náročnosti tohoto přístupu byla zvolena jednodušší varianta, která je snadno realizovatelná.

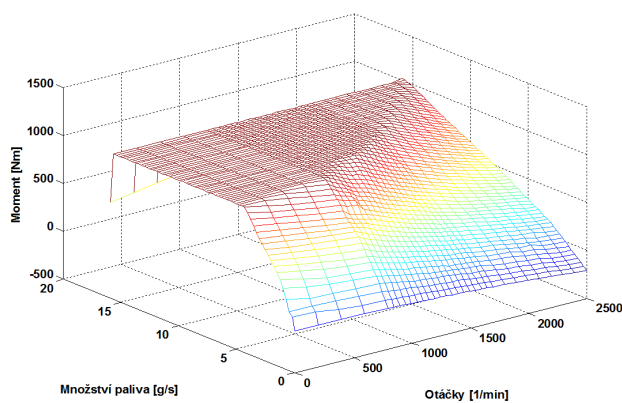
Použitá implementace

Efektivní moment motoru je počítán z množství spotřebovávaného paliva. To je určeno palivovou mapou motoru, tedy $\dot{m}_f = f(n, M_e)$. Tento přístup neodporuje principu kvalitativního řízení momentu vznětového motoru.

Závislost $\dot{m}_f = f(n, M_e)$ je nutné invertovat na $M_e = f(\dot{m}_f, n)$, aby mohl být vyčten moment podle dávky paliva a otáček motoru.

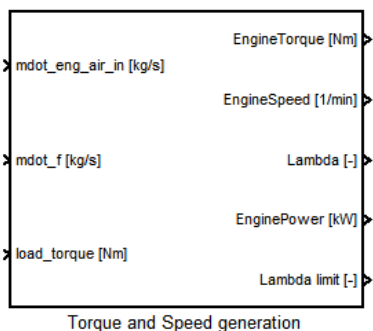


Obr. 3.19 Palivová mapa motoru



Obr. 3.20 Invertovaná palivová mapa motoru pro výpočet krouťícího momentu

3.3.2 BLOK VÝPOČTU MOMENTU A OTÁČEK MOTORU



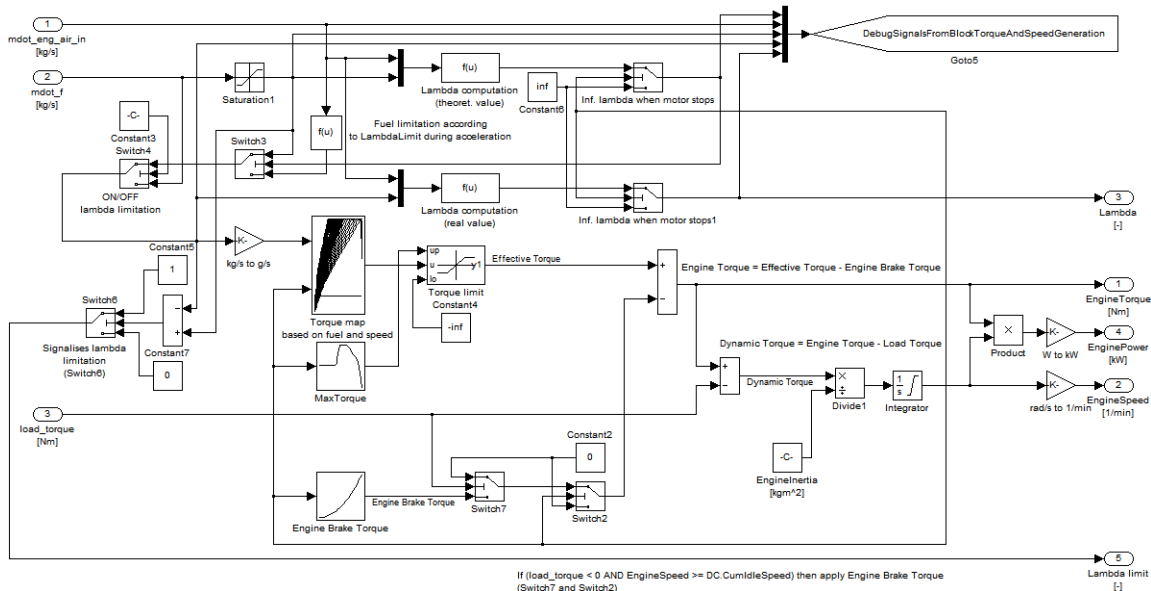
Obr. 3.21 Blok výpočtu momentu a otáček motoru

Vstupy

- $\dot{m}_{eng,air,in}$ [kg/s] – množství nasávaného vzduchu do motoru
- $\dot{m}_{dot,f}$ [kg/s] – množství vstřikovaného paliva
- $load_torque$ [Nm] – zatěžovací moment motoru

Výstupy

- EngineTorque [Nm] – efektivní moment motoru
- EngineSpeed [1/min] – otáčky motoru
- Lambda [-] – skutečná hodnota součinitele přebytku vzduchu
- EnginePower [kW] – výkon motoru
- Lambda limit [-] – dvouhodnotová informace (0/1) o limitaci výkonu SM s ohledem na omezení kouřivosti



Obr. 3.22 Vnitřní struktura bloku výpočtu momentu a otáček motoru

Množství paliva [kg/s] (vstup č.2) prochází nejprve blokem limitace, kde dojde k jeho zalimitování na interval 0 až $\max(\dot{m}_f = f(n, M_e))$. Zároveň se z množství do motoru nasávaného

vzduchu a z množství paliva vypočte hodnota součinitele přebytku vzduchu $\lambda = \frac{\dot{m}_{eng,air,in}}{\dot{m}_f \cdot 14,5}$. V případě,

Univerzita Pardubice Dopravní fakulta Jana Pernera	Dizertační práce	55
---	------------------	----

že je vypočtená hodnota nižší než je minimální dovolená hodnota, je dávka paliva redukována tak, aby odpovídala právě této minimální povolené hodnotě lambda a množství nasávaného vzduchu. Tímto jednoduchým způsobem je implementováno omezení kouřivosti motoru v přechodových stavech. Minimální hodnotu lambda lze nastavit proměnnou `DC.LambdaLimit` v inicializačním souboru modelu (defaultně nastaveno $\lambda_{\min} = 1,1$). Skutečná zalimitovaná hodnota lambda pak vystupuje z bloku ven (výstup 3 „Lambda [-]“). Jestliže motor stojí, nevstříkuje se žádné palivo a součinitel přebytku vzduchu je nastaven na nekonečno.

Pokud dochází k omezení dávky paliva, je nastaven výstup 5 „Lambda limit [-]” na hodnotu 1. Tuto informaci o omezení výkonu využívá model optimalizační jednotky řízení SM (kapitola 3.4).

Poté se vyčte hodnota momentu motoru z mapy $M_e = f(\dot{m}_f, n)$, která je implementována jako 2-D look-up tabulka. Vyčtený moment prochází blokem limitace momentu s ohledem na vnější momentovou charakteristiku motoru. Od tohoto efektivního momentu je odečten brzdny moment od motorové brzdy, je-li aktivní. Takto vypočtený moment motoru je vyveden ven z modelu (výstup 1 „EngineTorque“).

Výpočet otáček je založen na integraci pohybové rovnice:

$$J_c \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_e - M_b - M_z \quad (21)$$

Kde: M_e - efektivní moment motoru [Nm],

M_b - brzdny moment motorové brzdy [Nm],

M_z - zatěžovací moment [Nm] (vstup „load_torque” v modelu motoru),

J_c - celkový moment setrvačnosti spalovacího motoru s připojeným el. generátorem [kgm²],

ω - otáčky motoru [rad/s],

$\frac{d\omega}{dt}$ - zrychlení [rad/s²].

Efektivní moment motoru M_e v sobě zahrnuje pasivní ztráty třením (třecí moment M_f).

Vztah mezi M_e a M_f :

$$M_e = M_i - M_f \quad (22)$$

Kde: M_e - efektivní moment motoru [Nm],

M_i - indikovaný moment motoru [Nm],

M_f - ztráty třením [Nm].

Univerzita Pardubice Dopravní fakulta Jana Pernera	Dizertační práce	56
---	------------------	----

Pokud je dávka paliva nulová, tak je $M_i = 0$ a $M_e = -M_f$ (je záporný a rovný hodnotě třecího momentu při daných otáčkách), motor zpomaluje.

Pokud je dávka paliva nízká, ale nenulová a zároveň nižší než dávka paliva, při které moment motoru akorát stačí kryt ztráty třením (tj. $M_i < M_f$), je $M_e < 0$, ale nedosahuje plné výše třecího momentu M_f .

Integrace ztrátového třecího momentu je provedena v extrapolované palivové mapě motoru. Tímto je zajištěn plynulý přechod ze stavu bez zatížení do nízkého a plného zatížení.

Zatěžovací moment M_z je zátěžný moment, kterým je v aktuální okamžik zatěžován spalovací motor. M_z („load_torque“) je vstupem č. 3 v modelu a představuje zatěžovací moment generátoru připojeného ke spalovacímu motoru plus zatížení od pomocných spotřebičů.

Třecí moment M_f (ve vnitřní struktuře modelu se viditelně nevyskytuje) je zatěžovací moment vzniklý třením mechanických částí motoru. Třecí moment je určitým způsobem zahrnut do extrapolované palivové mapy motoru. Jeho průběh nebyl při parametrizaci modelu znám, proto byl použit experimentálně zjištěný vzorec z literatury [2]:

$$p_{me0f}(\omega) = k_1(\vartheta_\infty) \cdot (k_2 + k_3 \cdot S^2 \cdot \omega^2) \cdot \Pi_{e,\max} \cdot \sqrt{\frac{k_4}{B}} \quad (23)$$

Kde: p_{me0f} - střední efektivní tlak třecích ztrát,

ω - otáčky motoru [rad/s],

$k_1(\vartheta_\infty)$ - $1,44 \cdot 10^5$ [Pa],

k_2 - 0,5,

k_3 - $1,1 \cdot 10^{-3}$ [s²/m²],

k_4 - 0,075 [m],

S – zdvih motoru [m], použita hodnota 124 mm,

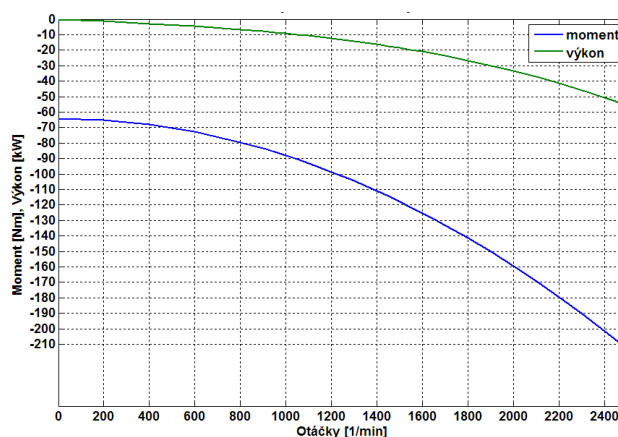
B – vrtání motoru [m], použita hodnota 107 mm,

$\Pi_{e,\max}$ - maximální stupeň přeplňování při nízkých otáčkách motoru, použita hodnota 2

$$M_f(\omega) = \frac{p_{me0f}(\omega) \cdot V_d}{4\pi} \quad (24)$$

Kde: M_f - třecí moment [Nm],

V_d - zdvihový objem motoru [m³], použita hodnota 6,7 litru.



Obr. 3.23 Průběh ztrát třením v modelu SM

Moment setrvačnosti J_c představuje celkový moment setrvačnosti motoru a připojeného generátoru. Za moment setrvačnosti je dosazena hodnota 2 kgm^2 , která se skládá z momentu setrvačnosti spalovacího motoru bez setrvačnicku ($0,48 \text{ kgm}^2$ – vyčteno z datasheetu) a z předpokládaného momentu setrvačnosti generátoru ($1,52 \text{ kgm}^2$ – stanoveno na základě podobných točivých strojů). Hodnotu momentu setrvačnosti lze nastavit pomocí proměnné `DC.EngineInertia` v inicializačním souboru modelu.

Integrací rovnice (21) se vypočítají otáčky spalovacího motoru. Integrátor má nastavenou spodní mez na 0 rad/s a horní mez na maximální otáčky motoru. Hodnota otáček z rad/s je pak pouze přepočtena na $1/\text{min}$ a je výstupem z bloku (výstup č. 2).

V bloku je vypočítán také výkon produkovaný motorem jako součin otáček a momentu (výstup č. 4):

$$\text{EnginePower}[\text{kW}] = \frac{\text{Speed}[\text{rad/s}] \times \text{EngineTorque}[\text{Nm}]}{1000} \quad (25)$$

Primární výstupní veličinou spalovacího motoru je moment na hřídeli, otáčky jsou závisle proměnnou.

3.3.3 MOTOROVÁ BRZDA

Vytvořený model SM umožňuje i provoz v režimu motorové brzdy. **Výkon motorové brzdy není říditelný, motorová se může nacházet jen ve dvou stavech – aktivní či neaktivní.**

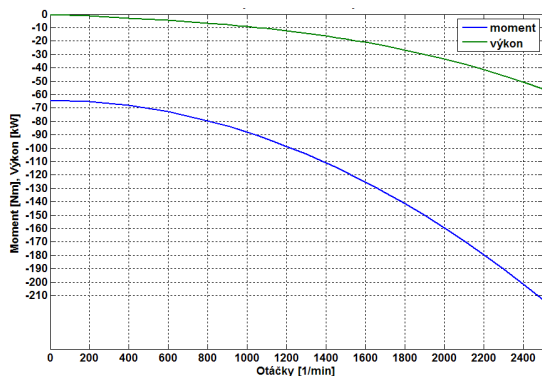
Motorová brzda se v modelu aktivuje automaticky pokud je zatěžovací moment záporný a otáčky SM jsou vyšší než volnoběžné, platí tedy podmínka:

- `LoadTorque < 0 AND Speed > IdleSpeed`

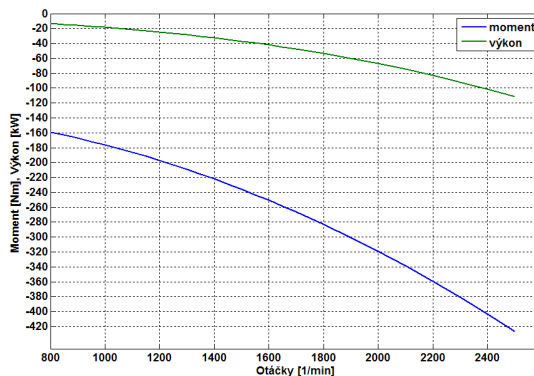
Při aktivaci motorové brzdy se automaticky přestane dávkovat palivo do motoru. Motorová brzda je aktivní až po překročení otáček volnoběhu, kvůli fázi startu motoru.

Charakteristika motorové brzdy (tj. průběh brzdného výkonu v závislosti na otáčkách SM) je dána tabulkou. Tabulka se nachází v inicializační funkci `DieselInit.m` a lze jí jednoduše

modifikovat dle potřeby. V aktuální verzi je výkonová charakteristika motorové brzdy rovna charakteristice třecích ztrát v motoru.



Obr. 3.24 Charakteristika motorové brzdy v modelu SM



Obr. 3.25 Celkový brzdový výkon SM

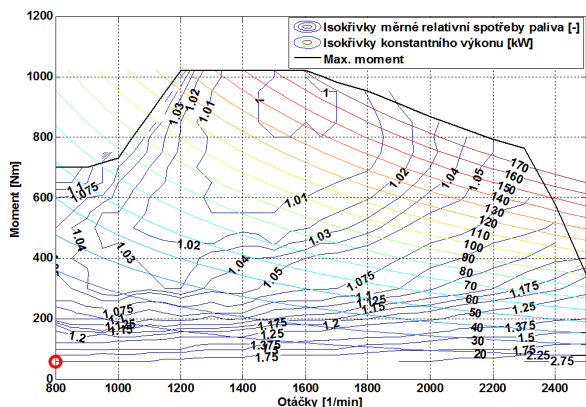
Celkový (dostupný) brzdový výkon je dán součtem třecích ztrát v SM a výkonu motorové brzdy, Obr. 3.25.

Motorová brzda není v této práci při simulacích pohonu použita.

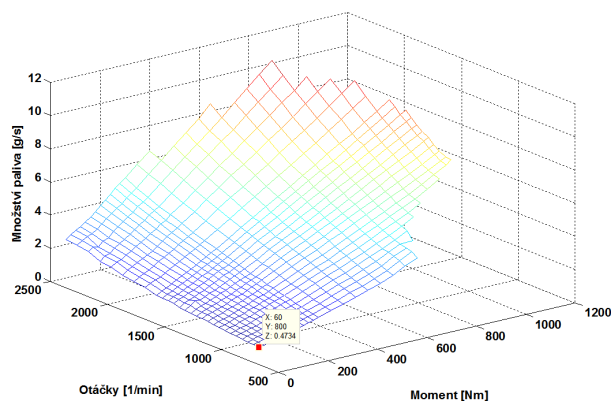
3.3.4 EXTRAPOLOVANÁ PALIVOVÁ MAPA

Při implementaci modelu se vyskytl problém s neúplností palivové mapy, což způsobovalo problematický chod modelu při velmi malých zatíženích.

Originální palivová mapa motoru nezačíná při nulových otáčkách a nulovém momentu. Tudíž při malých zatíženích motoru, kdy se pracovní bod v mapě pohybuje pod prvním bodem v mapě, je určování spotřeby paliva nepřesné. Tento první bod leží na souřadnicích 800 1/min a 60 Nm. Tomuto bodu odpovídá výkon 5,024 kW. Viz Obr. 3.26, zakroužkovaná krajní hodnota vlevo dole.



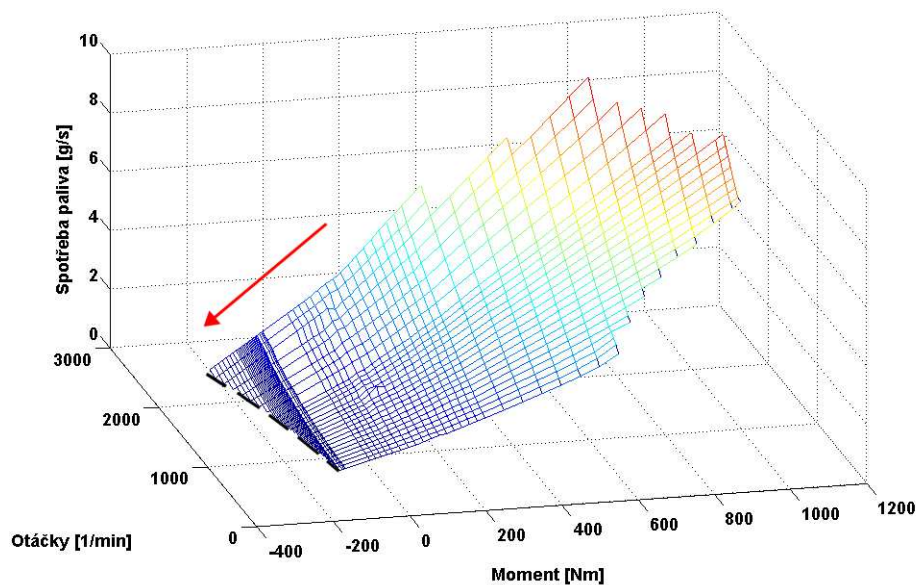
Obr. 3.26 Úplná charakteristika motoru se zakroužkovaným počátečním bodem



Obr. 3.27 Originální palivová mapa motoru s vyznačeným počátečním bodem

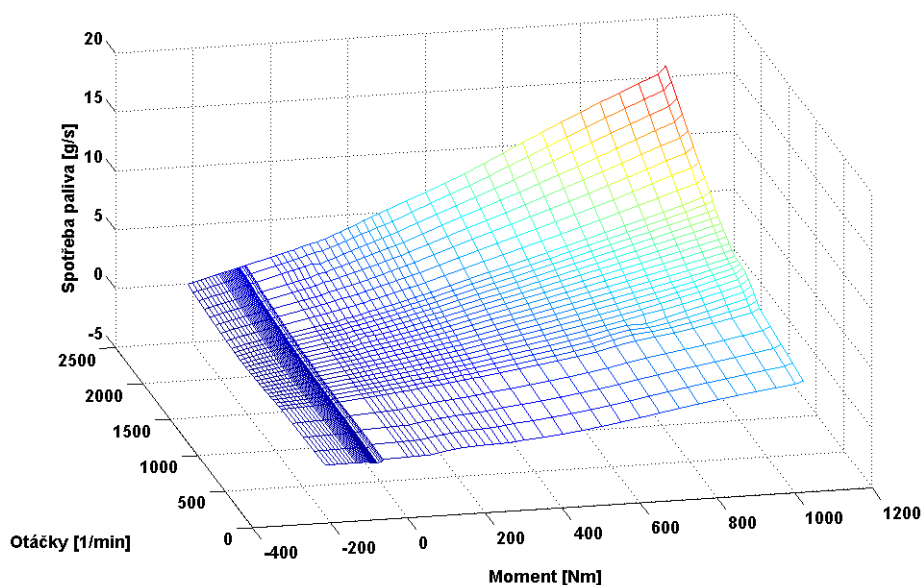
Proto byla originální palivová mapa motoru pro použití v modelu extrapolována až do nulových dávek paliva. Extrapolace byla provedena tak, aby nulové dávce paliva odpovídal třecí moment motoru

závislý na otáčkách. To mělo za následek „protažení“ originální palivové mapy ve směru otáček až do nuly otáček a ve směru momentu až k hodnotám třecího momentu motoru, tj. až do záporných hodnot momentu motoru.



Obr. 3.28 Palivová mapa extrapolovaná ve směru momentu
(černou čárkovanou čarou je naznačen průběh třecího momentu při nulové dávce paliva)

Vzhledem k tomu, že simulace vyžadují, aby mapa nebyla „zubatá“, byly chybějící body dopočítány a mapa byla protažena ve směru otáček až do nuly (Obr. 3.29).



Obr. 3.29 Výsledná extrapolovaná palivová mapa
(ve směru momentu i otáček)

Extrapolací byla zajištěna univerzální platnost pohybové rovnice motoru (21) i pro nízké dávky paliva, tedy v případě, kdy SM není vůbec zatížen a pouze překonává své vnitřní třecí odpory.

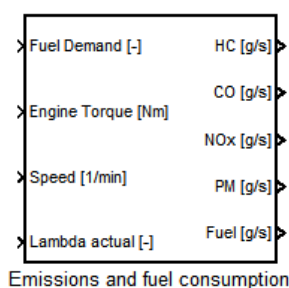
Extrapolací palivové mapy se také zpřesnil výpočet spotřeby paliva při nízkých zatíženích pod 5,024 kW. Přesto není přesnost určení spotřeby paliva při nízkých zatíženích pod 5,024 kW zaručena.

Hodinová spotřeba paliva při volnoběžných otáčkách a nulovém odebíraném výkonu (SM není vůbec ničím zatížen, pouze překonává své vnitřní pasivní odpory) činí v modelu reálných 1,17 l/h.

Při zatížení výkonem 5,1 kW činí spotřeba paliva opět reálných 2,06 l/h.

3.3.5 PRODUKCE EMISÍ A SPOTŘEBA PALIVA

Úkolem bloku *Emissions and fuel consumption* je výpočet spotřeby paliva a produkce emisních složek CO, HC, NO_x a PM.



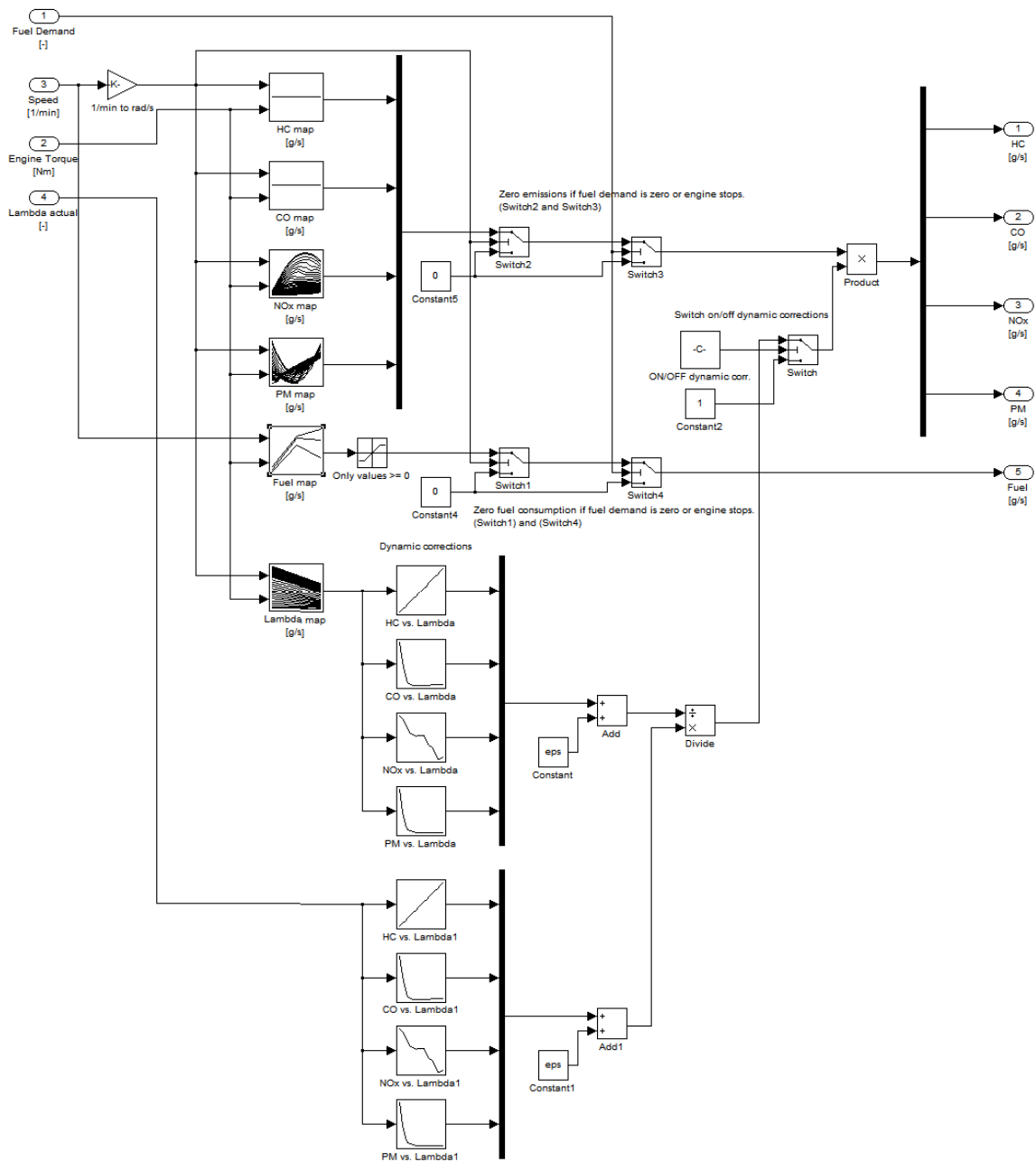
Obr. 3.30 Blok výpočtu produkce emisí a spotřeby paliva

Vstupy

- Fuel Demand [-] – žádaná hodnota dávky paliva (pouze logický vstup)
- Engine Torque [Nm] – kroutící moment motoru
- Speed [1/min] – otáčky motoru
- Lambda actual [-] – aktuální hodnota součinitele přebytku vzduchu λ

Výstupy

- HC [g/s] – produkce emisní složky nespálených uhlovodíků
- CO [g/s] – produkce emisní složky oxidu uhelnatého
- NO_x [g/s] – produkce emisní složky oxidů dusíku
- PM [g/s] – produkce emisní složky pevných částic
- Fuel [g/s] – spotřeba paliva



Obr. 3.31 Vnitřní struktura bloku produkce emisí a spotřeby paliva

Výpočet spotřeby paliva

Spotřeba paliva je vypočtena velice jednoduchým způsobem a to vyčtením hodnoty z extrapolované palivové mapy $\dot{m}_f = f(n, M_e)$ dle aktuálních otáček a momentu motoru. Palivová mapa je uložena ve 2-D look-up tabulce.

Jako pojistka zde působí vstup č. 1 („Fuel demand“). Pokud není dávkováno palivo do motoru nebo jsou nulové otáčky, je aktuální spotřeba paliva nastavena na nulu. Bez tohoto opatření by se mohlo stát, že i motor nevytvářející hnací moment bude spotřebovávat určité minimální množství paliva.

Výpočet produkce emisních složek

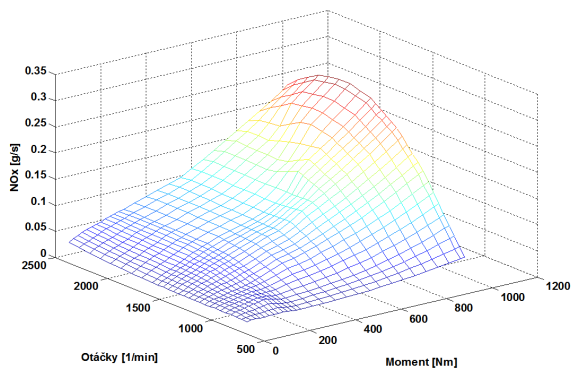
Produkce jednotlivých emisních složek jsou také uloženy ve statických mapách v závislosti na otáčkách a momentu motoru.

- $CO = f(n, M_e)$ [g/s]
- $HC = f(n, M_e)$ [g/s]
- $NO_x = f(n, M_e)$ [g/s]
- $PM = f(n, M_e)$ [g/s]

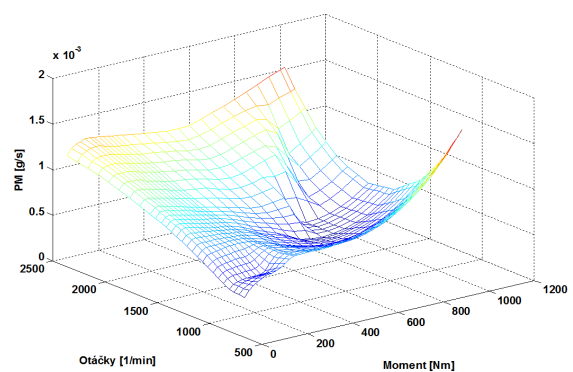
Systém katalytické úpravy výfukových zplodin není modelován, dochází pouze k vyčítání hodnot emisí z map odměřených ve statickém režimu na dynamometru. Tyto hodnoty jsou následně korigovány v přechodových stavech, pokud dochází k omezení výkonu motoru s ohledem na kouřivost.

Pokud není dávkováno palivo do motoru nebo jsou nulové otáčky, je produkce emisí nastavena na nulu. Je to z toho důvodu, že mapy emisí nepokrývají pásmo otáček a momentu od nulových hodnot. Bez tohoto opatření by se mohlo stát, že i stojící motor / motor nevytvářející hnací moment bude produkovat emise výfukových plynů. Mapy emisí nebyly, na rozdíl od palivové mapy, extrapolovány až do nulových hodnot otáček a momentu motoru.

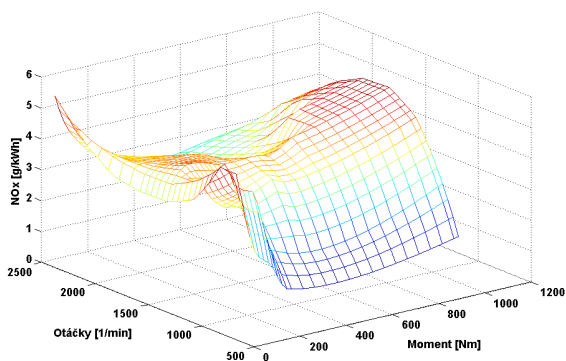
Mapy CO a HC nejsou v modelu zaneseny, protože údaje nebyly dostupné. Model je naparametrován pouze mapami pro NO_x a PM.



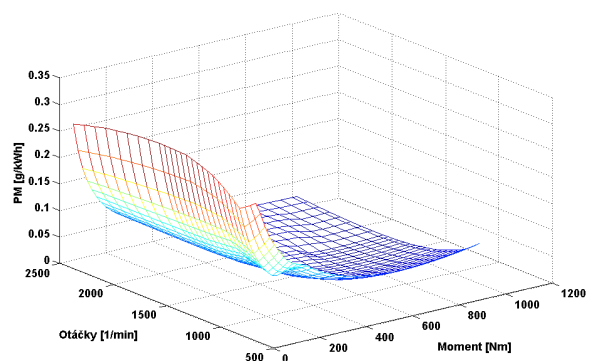
Obr. 3.32 Mapa produkce NO_x [g/s]



Obr. 3.33 Mapa produkce PM [g/s]



Obr. 3.34 3D graf měrné produkce NO_x [g/kWh]



Obr. 3.35 3D graf měrné produkce PM [g/kWh]

Univerzita Pardubice Dopravní fakulta Jana Pernera	Dizertační práce	63
---	------------------	----

Korekce emisí v přechodových stavech je zde zavedena pro zpřesnění modelu, protože údaje vyčítané z map jsou platné pouze v ustálených režimech, nikoliv v přechodových stavech.

Korekce je založena na porovnání velikosti součinitele přebytku vzduchu λ v přechodovém stavu a ve stavu ustáleném pro daný pracovní bod (otáčky, moment).

Princip korekce spočívá ve:

- Vyčtení hodnoty součinitele přebytku vzduchu ze statické mapy $\lambda = f(n, M_e)$, tj. hodnoty platné pro ustálený stav.
- Výpočtu produkce příslušné emisní složky dle hodnoty lambda platné pro ustálený stav (z předchozího bodu)
- Výpočtu produkce příslušné emisní složky dle aktuální hodnoty lambda – bude se v přechodovém stavu lišit od ustálené hodnoty pro dvojici otáčky, moment.
- Výpočtu korekčního součinitele pro příslušnou emisní složku – jako poměr hodnot z bodu c) ku hodnotě z bodu b)
- Vynásobení vyčtené hodnoty produkce příslušné emisní složky ze statické mapy tímto korekčním součinitelem z bodu d)

Korekční faktor se tedy vypočte jako:

$$X_{corr} = \frac{EIX(\lambda_{dyn})}{EIX(\lambda_{qs})} \quad (26)$$

Kde: X - příslušná složka emisí (CO, HC, PM, NO_x)

$EIX(\lambda_{dyn})$ - hodnota emisní složky X dle hodnoty lambda v přechodovém stavu

$EIX(\lambda_{qs})$ - hodnota emisní složky X dle hodnoty lambda ve statickém režimu

EI – značí emisní index (tj. produkce emisní složky v gramech na kilogram paliva)

Kvazistacionární hodnota emisí vyčtená z mapy $X = f(n, M_e)$ se vynásobí tímto korekčním součinitelem:

$$X_{final} = X(n, M_e) \cdot X_{corr} \quad (27)$$

Tím se získá správná hodnota v přechodovém stavu.

Podrobné informace o použitém algoritmu korekce emisí v přechodových stavech lze nalézt v příloze č. 1.

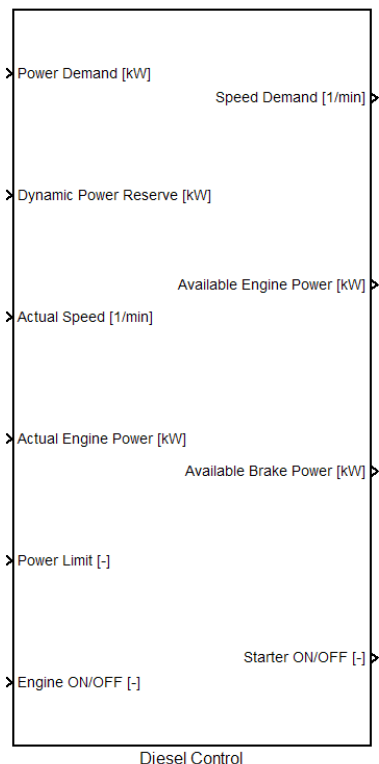
Korekci v přechodových stavech lze řídit (zapnout nebo vypnout) nastavením proměnné `DC.EmissionsDynamicCorrEnable` (0 – korekce vypnuta, 1 – korekce zapnuta) v inicializačním souboru modelu.

Kumulovanou spotřebu paliva [g] a kumulovanou produkci emisí [g] lze jednoduše vypočítat integrací výstupů z modelu.

3.3.6 SOUHRN VLASTNOSTÍ MODELU SM

- Je zohledněna dynamika motoru, uvažuje se moment setrvačnosti rotujících dílů motoru a částečně dynamika nasávaného vzduchu do motoru. Jelikož zjednodušený model neobsahuje turbodmychadlo, reaguje rychleji než je reálné, díky absenci turboefektu.
- Otáčky motoru jsou závisle proměnná, vstupem do modelu je požadavek na moment [%] a zatěžovací moment [Nm], výstupem jsou otáčky a další veličiny.
- Není modelována teplota motoru, předpokládá se provoz motoru při pracovní teplotě.
- V modelu je možné zapnout korekci produkce emisí v přechodových stavech. Systém čištění spalin není modelován.
- Model SM pracuje s extrapolovanou palivovou mapou.
 - Tím je zajištěn bezproblémový chod modelu při dávkách paliva blízkých se nule.
 - Efektivní moment motoru vyčítaný z invertované palivové mapy v sobě zahrnuje i ztráty třením (třecí moment). Efektivní moment motoru tudíž může nabývat jak kladných tak i záporných hodnot (při malých dávkách až nulové dávce paliva).
- Přesnost výpočtu spotřeby paliva při nízkých zatíženích (pod 5,024 kW) byla zpřesněna, ale stále není zaručena, protože je spotřeba paliva vyčítána z extrapolované části palivové mapy.
- Fáze startu SM není modelována přesně, nelze se příliš spoléhat na hodnoty spotřeby paliva a produkce emisí v této fázi. Důvodem jsou chybějící data od výrobce.
- Model SM obsahuje jednoduchý model motorové brzdy.
 - Výkon motorové brzdy není říditelný. Po její aktivaci motorová brzda brzdí výkonem v závislosti na otáčkách SM.
 - Motorová brzda se aktivuje automaticky jakmile je zatěžovací moment záporný a otáčky SM jsou minimálně volnoběžné nebo vyšší.
 - Při její aktivaci se automaticky přeruší přívod paliva do motoru, nezávisle na žádané hodnotě momentu (vstup „Torque demand“).
 - Charakteristika motorové brzdy má v aktuálním modelu stejný průběh jako průběh třecích ztrát v SM.
 - Charakteristika motorové brzdy je dána tabulkou, jejíž hodnoty lze jednoduše modifikovat a přizpůsobit model novému stavu.
- Model SM lze startovat přivedením záporného zatěžovacího momentu a nastavením nenulové žádané hodnoty momentu [%] (sešlápnutí plynu).
 - Po dosažení startovacích otáček (120 1/min) je aktivováno vstřikování a SM se sám začne urychlovat.
- Model SM neobsahuje regulátor otáček. Ten je nutné k modelu připojit externě. Výstupem z toho regulátoru je požadavek na moment motoru [%].

3.4 MODEL OPTIMALIZAČNÍ JEDNOTKY ŘÍZENÍ SPALOVACÍHO MOTORU



Obr. 3.36 Model optimalizační jednotky řízení vznětového spalovacího motoru

Vstupy

- Power Demand [kW] – žádaná hodnota efektivního výkonu SM
- Dynamic Power Reserve [kW] – rezerva pro dynamický výkon
- Actual Speed [1/min] – skutečné otáčky SM
- Actual Engine Power [kW] – skutečný efektivní výkon SM
- Power Limit [-] – logická dvouhodnotová informace o dočasném omezení výkonu SM, (0 – výkon není omezen, 1 – výkon je omezen)
- Engine ON/OFF [-] – logický dvouhodnotový povel SM běží (1) / SM vypnut (0)

Výstupy

- Speed Demand [1/min] – žádaná hodnota otáček motoru (vstupuje do regulátoru otáček motoru)
- Available Engine Power [kW] – dostupný efektivní výkon v motorovém režimu, kterým je možné v daný okamžik zatěžovat spalovací motor (informace pro nadřazený systém řízení hybridního pohonu)
- Available Brake Power [kW] – dostupný efektivní výkon v brzděném režimu, který je schopen motor při daných otáčkách absorbovat (informace pro nadřazený systém řízení hybridního pohonu)
- Starter ON/OFF [-] – logický dvouhodnotový signál pro spuštění (1) / zastavení (0) startéru. Startér je aktivován na určitou dobu v okamžiku, kdy je na logickém vstupu „Engine ON/OFF“ detekována vzestupná hrana (odpovídá tomu, kdy motor stojí a přijde povel k jeho spuštění). Délku startování lze nastavit konstantou `DC.CumStartDuration` v inicializační funkci `DieselInit.m`. Konkrétní způsob startování SM je uveden v kapitole 5.1.2.

Popis funkce

Na základě žádaného výkonu vypočítává optimální otáčky SM a dle aktuálního pracovního bodu SM vypočítává i dostupný výkon, kterým lze SM v dané chvíli zatěžovat, a dostupný brzdňý výkon v brzděném režimu SM. Vypočtené optimální otáčky vstupují skrze otáčkovou rampu do regulátoru otáček SM, který má za úkol nastavit nový pracovní bod SM. Otáčková rampa není součástí bloku *Diesel Control*.

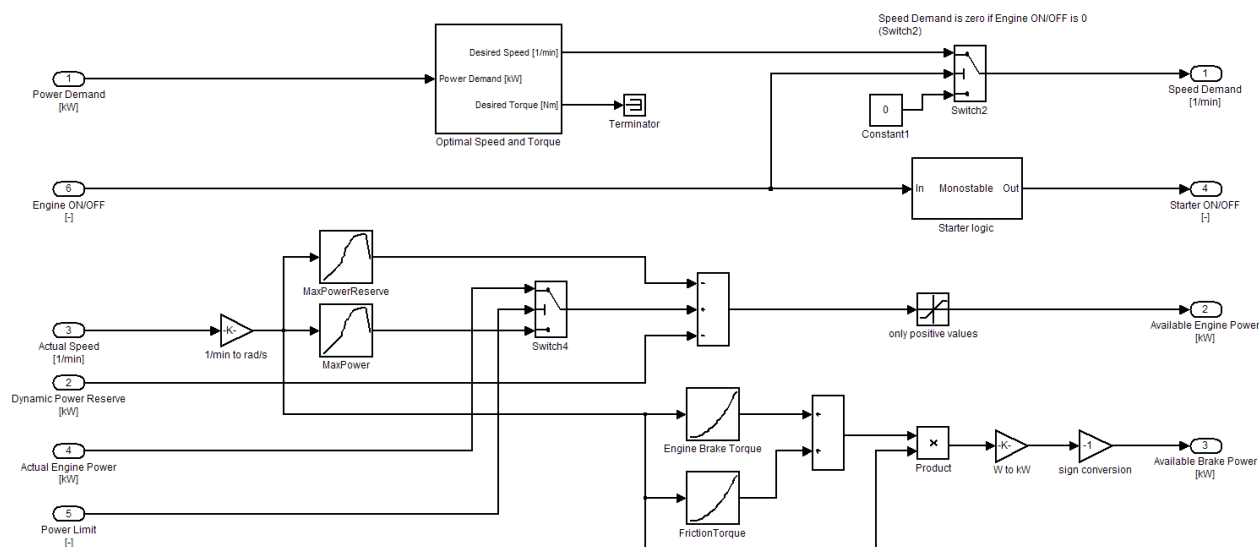
Informace o dostupných výkonech v motorovém a brzděném režimu jsou vyžadovány nadřazeným systémem řízení hybridního pohonu. Návrh tohoto systému není úkolem této práce.

Optimální otáčky SM jsou vypočteny z průběhu optimální trajektorie otáček v rovině otáčky – výkon (tj. závislost otáček na požadovaném výkonu SM). Tato trajektorie může nabývat různého tvaru, dle zvoleného optimalizačního kritéria (minimální spotřeba paliva, minimální produkce emisí apod.). Výběr trajektorie se provádí v inicializačním souboru *DieselInit.m*.

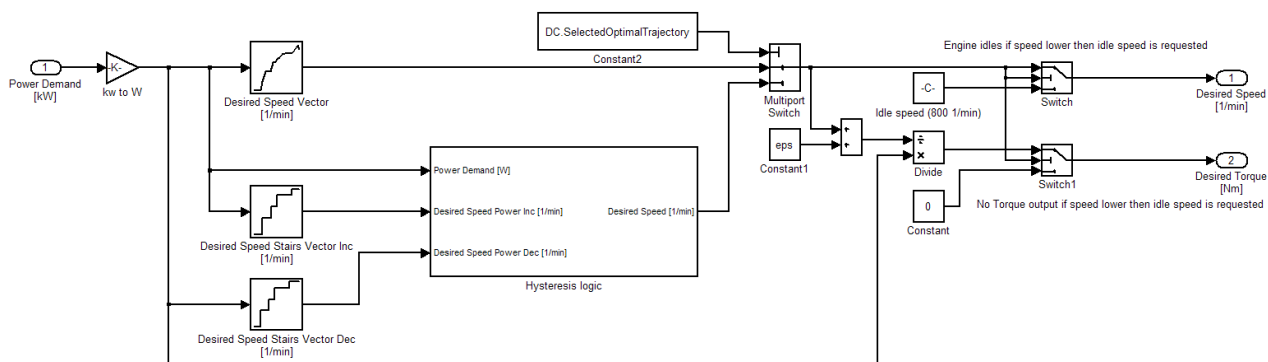
Trajektorie je načtena do look-up tabulek modelu po spuštění inicializačního skriptu *model_init.m*. V něm je volána funkce `function [DC] = DieselInit()`, která je umístěna v souboru *DieselInit.m*, a která vrací strukturu DC s parametry a mapami potřebnými pro inicializaci modelu v Simulinku.

Vnitřní struktura modelu

Model ve své vnitřní struktuře používá subsystém *Optimal Speed and Torque*, který má za úkol nalezení optimálních otáček a jim odpovídající kroutící moment dle žádaného výkonu SM. Dále obsahuje bloky, které řeší výpočet dostupného výkonu v motorovém a brzděném režimu, a logiku pro startování a vypínání SM (subsystém *Starter logic* + přepínač *Switch2*), Obr. 3.37.



Obr. 3.37 Vnitřní struktura modelu *Diesel Control*



Obr. 3.38 Vnitřní struktura subsystému *Optimal Speed and Torque*

Přepínač *Multiport Switch* na Obr. 3.38 vybírá spojitou nebo schodovitou optimální trajektorii dle hodnoty proměnné *DC.SelectedOptimalTrajectory* v inicializačním skriptu.

3.4.1 ZPŮSOB PRÁCE SE SM

Hlavní výstupy z jednotky *DieselControl* jsou:

- Optimální hodnota otáček odpovídající požadovanému výkonu. (Tato hodnota bude vstupovat do otáčkového regulátoru SM.)
- Dostupný výkon SM, kterým lze v aktuální chvíli zatěžovat SM. (Informace pro nadřazený systém řízení hybridního pohonu.)

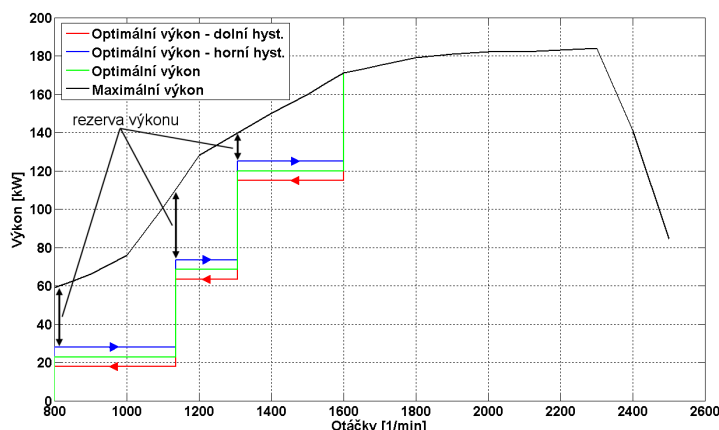
Způsob stanovení optimálních otáček byl uveden v kapitole 3.1.

Výkon, kterým lze v aktuální okamžik zatěžovat SM závisí na dvou faktorech:

- Maximální výkon při aktuálních otáčkách – ten udává vnější charakteristika motoru (obálka max. výkonu)
- Zda je požadavek na urychlení SM do vyšších otáček či nikoliv → je nutné počítat s rezervou pro dynamický výkon/moment.

Během simulací byly zjištěny možné problémy při provozu SM v otáčkách, které odpovídají takové hodnotě výkonu/momentu, která se blíží obalové křivce max. výkonu/momentu. Bylo zjištěno, že při požadavcích na vyšší výkon, tj. vyšší otáčky, nemusí být dostatek výkonu/momentu pro urychlení SM na tyto vyšší otáčky. Zároveň bylo zjištěno, že v těchto případech nemůže SM okamžitě dodávat požadovaný výkon, ale je nutné nechat SM přejít do vyšších otáček a teprve následně začít odebírat požadovaný výkon v plné výši.

Vzhledem k tomu, že použitý SM bude provozován max. do otáček 1600 1/min, budou se pracovní body nacházet mimo tuto nepříjemnou oblast. Tudíž bude vždy přítomná rezerva výkonu/momentu pro urychlení motoru do vyšších otáček, aniž by se kvůli urychlení motoru musel snižovat aktuální skutečně odebíraný výkon nebo posouvat optimální trajektorie ze své optimální polohy (Obr. 3.39).



Obr. 3.39 Výkonová rezerva pro urychlení SM do vyšších otáček

3.4.2 VÝPOČET DOSTUPNÉHO VÝKONU SM V MOTOROVÉM REŽIMU

Pod pojmem dostupný výkon se míní skutečný maximální výkon, kterým lze při daných otáčkách zatěžovat SM na hřídeli, aby byla zachována schopnost přechodu na vyšší otáčky.

V modelu je třeba zohlednit i možné snížení výkonu SM během prudkých akcelerací (s ohledem na kouřivost), kdy je vlivem omezení dávky paliva samotnou ŘJ SM omezen kroutící moment motoru. Ten v této přechodové fázi neodpovídá maximálnímu efektivnímu momentu při daných otáčkách v ustáleném stavu. S tímto možným krátkodobým omezením výkonu SM počítá i algoritmus výpočtu dostupného výkonu SM.

Algoritmus výpočtu dostupného výkonu je následující

Pokud: vstup „Power Limit“ = 0 jednotky *DieselControl* (pokud není aktivní omezení výkonu SM s ohledem na kouřivost)

Pak: $P_{\text{dostMax}}(n) = P_{\text{max}}(n) - P_{\text{dyn}}(n) - P_{\text{rez}}(n)$

Jinak: $P_{\text{dostMax}}(n) = P_{\text{e}}(n) - P_{\text{dyn}}(n) - P_{\text{rez}}(n)$

Kde: $P_{\text{dostMax}}(n)$ – dostupný výkon SM v motorovém režimu (výstup „Available Engine Power“ v modelu, Obr. 3.36), $P_{\text{dostMax}}(n) \geq 0$

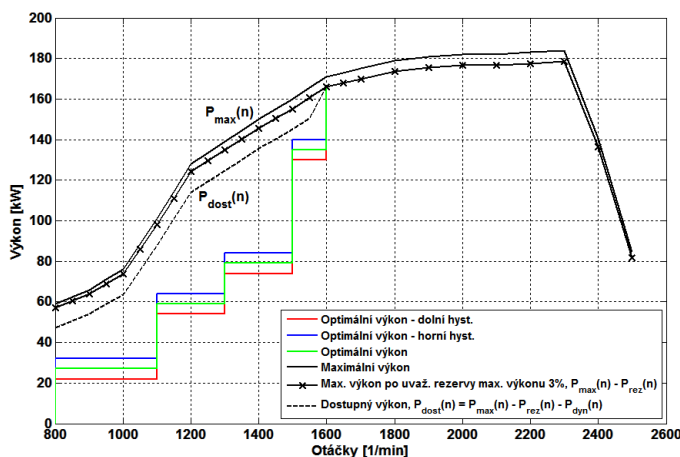
$P_{\text{max}}(n)$ – maximální výkon SM při aktuálních otáčkách, odečten z křivky maximálního výkonu uvedené v datasheetu SM

$P_{\text{dyn}}(n)$ – rezerva pro dynamický výkon (vstup „Dynamic Power Reserve“ v modelu, Obr. 3.36)

$P_{\text{rez}}(n)$ – rezerva max. výkonu

$P_{\text{e}}(n)$ – skutečný výkon SM při aktuálních otáčkách (vstup „Actual Engine Power“ v modelu, Obr. 3.36)

Poznámka: Všechny výkony jsou efektivní.



Obr. 3.40 Dostupný výkon SM

Pokud není SM v omezení (vstup „Power Limit“ = 0 v modelu), je dostupný výkon počítán jako $P_{\text{dostMax}}(n) = P_{\text{max}}(n) - P_{\text{dyn}}(n) - P_{\text{rez}}(n)$.

Pokud je SM v omezení, je maximální hodnota momentu SM při aktuálních otáčkách (jinak normálně odečtená z průběhu obálky max. momentu) nahrazena aktuálním výkonem SM. Dostupný výkon se v tomto případě počítá jako $P_{\text{dostMax}} = P_e(n) - P_{\text{dyn}}(n) - P_{\text{rez}}(n)$.

Na reálném SM lze informaci o omezení výkonu v přechodovém stavu i informaci o aktuálním výkonu SM získat z údajů posílaných ŘJ motoru po sběrnici CAN protokolem J1939.

3.4.3 VÝPOČET DOSTUPNÉHO VÝKONU SM V BRZDNÉM REŽIMU

Dostupný výkon brzděném režimu motoru, kdy není dodáváno palivo, je dán součtem třecích odporů motoru s výkonem motorové brzdy.

$$P_{\text{dostMin}}(n) = -P_f(n) - P_b(n) \quad (28)$$

Kde: $P_{\text{dostMin}}(n)$ – dostupný výkon SM v brzděném režimu (výstup „Available Brake Power“ v modelu, Obr. 3.36), $P_{\text{dostMin}}(n) \leq 0$

$P_f(n)$ – ztráty třením

$P_b(n)$ – výkon motorové brzdy

Průběh ztrát třením, průběh brzděného výkonu motorové brzdy a celkový dostupný brzděný výkon v závislosti na otáčkách SM byly uvedeny v kapitole 3.3.3.

3.4.4 REZERVA NA DYNAMICKÝ VÝKON

Dynamickou výkonovou rezervu $P_{\text{dyn}}(n)$ lze volit dle požadovaného urychlení SM do vyšších otáček. Dále může být hodnota výkonové rezervy konstantní nezávislá na otáčkách nebo ji lze přizpůsobovat dle otáček. Konstantní výkonové rezervě bude při nižších otáčkách odpovídat vyšší moment, tudíž SM bude rychleji přecházet do vyšších otáček a naopak.

Stanovení velikosti rezervy na dynamický výkon:

$$J_c \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_e - M_z \quad \Rightarrow \quad J_c \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_{dyn} \quad (29)$$

$$P_{dyn} = M_{dyn} \cdot \omega \quad (30)$$

$$J_c \cdot \frac{d\omega}{dt} = \frac{P_{dyn}}{\omega} \quad \Rightarrow \quad \frac{d\omega}{dt} = \frac{P_{dyn}}{\omega \cdot J_c} \quad (31)$$

Kde: P_{dyn} - výkonová rezerva pro urychlení SM (rezerva pro dynamický výkon)

J_c - moment setrvačnosti SM + připojeného el. generátoru ($J_c = 2 \text{ kgm}^2$)

M_e - efektivní moment SM

M_z - zatěžovací moment

ω - otáčky SM

Předpokládáme výkonovou rezervu pro urychlení $P_{dyn} = 10 \text{ kW}$.

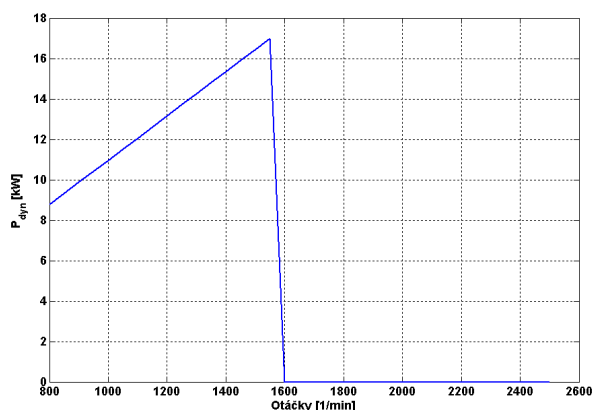
Tab. 3.3 Počáteční zrychlení SM při konstantní rezervě výkonu $P_{dyn} = 10 \text{ kW}$

n [1/min]	800	1136	1308	1600
M_{dyn} [Nm]	119	84	73	59
$\frac{d\omega}{dt}$ [rad/s/s]	59,7 (569 1/min/s)	42,03 (401 1/min/s)	36,5 (348 1/min/s)	29,8 (285 1/min/s)

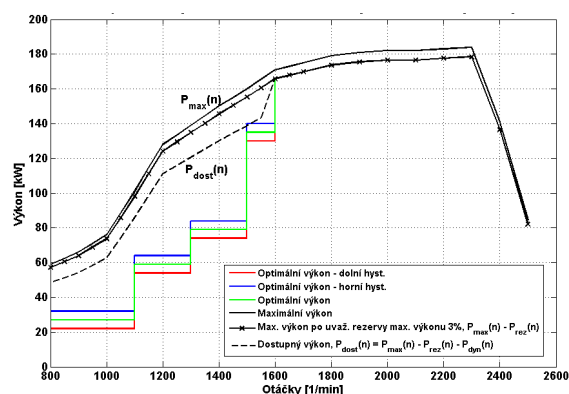
Velikost rezervy na dynamický výkon ovlivňuje průběh dostupného výkonu. Průběh dostupného výkonu na Obr. 3.40 odpovídá $P_{dyn} = 10 \text{ kW}$, přičemž nad maximálními pracovními otáčkami el. generátoru (1600 1/min) je zbytečné držet nenulovou rezervu na dynamický výkon, je proto nulová. Tím je umožněno, aby SM pracoval při těchto otáčkách s plným výkonem.

Rezervu na dynamický výkon lze také volit s ohledem na strmost otáčkové rampy žádané hodnoty otáček SM. Pokud bude strmost otáčkové rampy konstantní ($\frac{d\omega}{dt} = konst.$), bude se s otáčkami zvyšovat rezerva na dynamický výkon, $P_{dyn} = f(\omega)$ při konstantní hodnotě strmosti otáčkové rampy. SM tak bude urychlován konstantním momentem vždy stejným zrychlením do vyšších otáček, nezávisle na aktuální hodnotě otáček.

Situaci zachycují následující obrázky.



Obr. 3.41 Průběh rezervy dynamického výkonu v závislosti na otáčkách a otáčkové rampě (strmost otáčkové rampy 500 1/min/s)



Obr. 3.42 Průběh dostupného výkonu v závislosti na otáčkách a otáčkové rampě (strmost otáčkové rampy 500 1/min/s)

Pokud není určeno jinak, je v simulacích použita konstantní hodnota $P_{\text{dyn}} = 10 \text{ kW}$.

3.4.5 REZERVA MAXIMÁLNÍHO VÝKONU

V praktickém nasazení algoritmu je nutné vzít v úvahu fakt, že křivka maximálního výkonu SM byla měřena při určitých podmínkách (teploty motoru, typ paliva, atmosférický tlak, teplota, vlhkost apod.).

Tudíž v praktickém provozu může být skutečné maximum výkonu při daných otáčkách jiné, než odpovídá křivce uvedené v datasheetu k SM, a ze které se vychází při návrhu algoritmu.

Souhrn vlivů ovlivňujících průběh křivky max. výkonu:

- Atmosférické podmínky (teplota, tlak, vlhkost) – především vliv tlaku (souvisí s nadmořskou výškou) řádově jednotky procent (např. 1500 m.n.m. → výkon motoru snížen o cca 20 % vůči hladině moře).
- Teplota motoru.
- Kvalita paliva.
- Opotřebením motoru.
- Přesnost výsledků uvedených v datasheetu k SM.

Proto byla do výpočtu dostupného výkonu zanesena rezerva max. výkonu o velikosti 3 %.

Poznámka

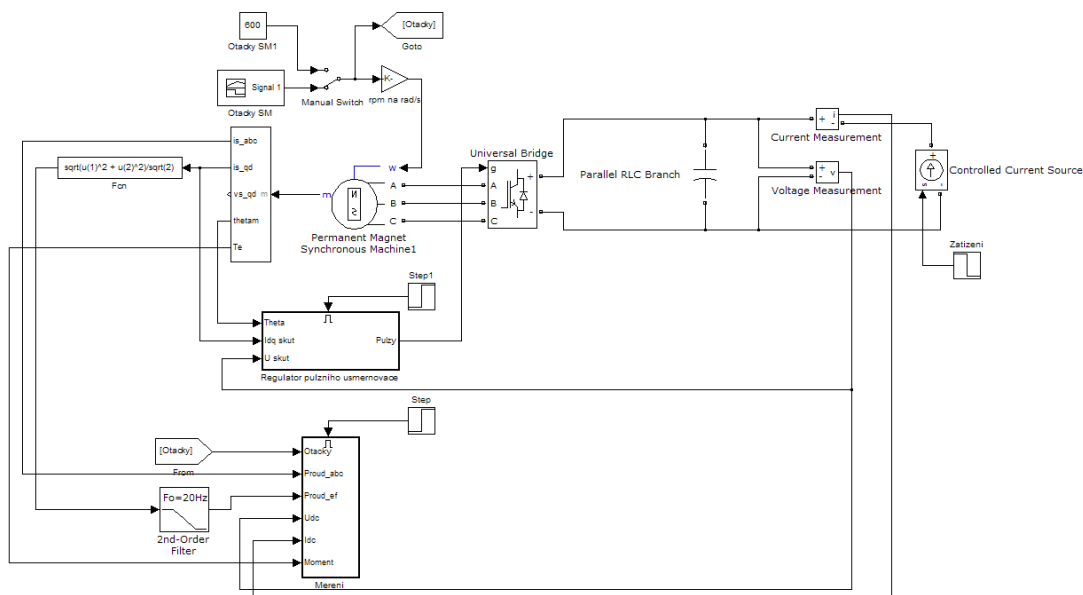
Křivka max. výkonu v datasheetu SM nezahrnuje příkon alternátoru 24 V, ventilátoru chladiče a kompresoru. Tyto příkony budou zahrnuty do požadovaného výkonu, který je vstupem do jednotky optimálního řízení SM *DieselControl*. Žádanou hodnotu výkonu SM $P_{\text{žád}}$ vypočítává nadřazený systém řízení hybridního pohonu. Veškeré pomocné spotřebiče hybridního autobusu jsou elektricky napájené.

3.4.6 SOUHRN VLASTNOSTÍ MODELU OPTIMALIZAČNÍ JEDNOTKY ŘÍZENÍ SM

- Výpočet optimálních otáček SM dle žádaného výkonu.
 - Výpočet optimálních otáček SM je založen na předem vypočtené trajektorii otáček v rovině otáčky – výkon, resp. otáčky - moment. Tato trajektorie může být obecně sestrojena na základě různých kritérií. V práci byla použita optimalizace na minimální spotřebu paliva.
- Výpočet aktuálně dostupného výkonu v motorovém režimu, kterým může být SM v daný okamžik skutečně zatěžován.
 - Model bere v potaz rezervu max. výkonu, rezervu dynamického výkonu a případné omezení výkonu řídicí jednotkou SM s ohledem na omezení kouřivosti při prudkých akceleracích. Dostupný hnací výkon je ≥ 0 .
- Výpočet aktuálně dostupného výkonu v brzděném režimu.
 - Je součtem ztrát třením s výkonem motorové brzdy při aktuálních otáčkách. Dostupný brzdový výkon je ≤ 0 .
- Spalovací motor lze kdykoliv zastavit a opětovně nastartovat pomocí vstupního dvouhodnotového signálu „Engine ON/OFF“.
 - Pokud „Engine ON/OFF“ = 1 \Rightarrow motor běží (pokud předtím neběžel, tak se nejprve nastartuje)
 - Pokud „Engine ON/OFF“ = 0 \Rightarrow povel k zastavení motoru
 - Bližší informace o způsobech startování a zastavení SM jsou uvedeny v příloze č. 3.
- Motorová brzda SM není jednotkou *Diesel Control* ovládána.
 - Motorová brzda se aktivuje automaticky v modelu SM, jakmile je zatěžovací moment záporný a otáčky SM jsou minimálně volnoběžné nebo vyšší.
 - Na vstup „Power Demand“ nemá smysl přivádět zápornou hodnotu žádaného výkonu, model na ní nebude reagovat (vypočtené optimální otáčky budou rovny volnoběžným).
- Parametry nutné pro nastavení modelu obsahuje inicializační funkce *DieselInit.m*, která je společná pro model *Diesel Control* i pro model spalovacího motoru.
 - Před spuštěním modelů je nutné spustit inicializační skript *model_init.m*, který interně volá funkci *DieselInit.m*, čímž se ve workspace vytvoří globální struktura DC s parametry a tabulkami nutnými pro chod modelů.

3.5 MODEL ALTERNÁTORU

Model alternátoru představuje regulační strukturu stabilizace usměrněného napětí U_{DC} stejnosměrného meziobvodu. Tato struktura se skládá z modelu PMSG, modelu pulzního usměrňovače, modelu regulační struktury vektorového řízení momentu PMSG, modelu regulace stejnosměrného napětí U_{DC} a modelu stejnosměrného meziobvodu (Obr. 3.43).



Obr. 3.43 Simulační model regulace stejnosměrného napětí U_{DC}

V co největší míře byly použity modely z knihovny SimPowerSystems programu Simulink. Tato knihovna obsahuje již hotové modely komponent z oblasti výkonové elektroniky a el. pohonů.

Simulační model vychází z regulační struktury uvedené na Obr. 2.27. Blok *Mereni* na Obr. 3.43 pouze zajišťuje sběr hodnot během simulace a jejich ukládání do workspace Matlabu. Po skončení simulace je tak možné vykreslit grafy.

3.5.1 MODEL PMSG

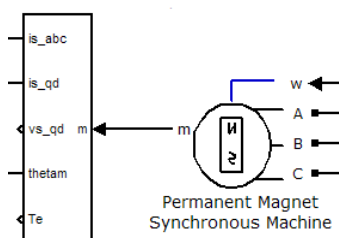
Jako model synchronního generátoru s permanentními magnety byl použit již hotový model z knihovny SimPowerSystem v Simulink. Matematický model stroje je tvořen následujícími rovnicemi.

$$\frac{d}{dt} i_d = \frac{1}{L_d} u_d - \frac{R}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} p_p \omega_r i_q \quad (32)$$

$$\frac{d}{dt} i_q = \frac{1}{L_q} u_q - \frac{R}{L_q} i_q - \frac{L_d}{L_q} p_p \omega_r i_d - \frac{\Psi_f p_p \omega_r}{L_q} \quad (33)$$

$$M = \frac{3}{2} p_p [\Psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (34)$$

kde u_d , u_q je svorkové napětí stroje transformované do d, q os, i_d , i_q tokotvorná a momentotvorná složka proudu statoru, R odpor vinutí statoru, L_d , L_q podélná a příčná indukčnost, Ψ_f spřažený magnetický tok permanentních magnetů, p_p počet pólů, ω_r úhlová rychlost rotoru a M elektrický moment motoru.



Vstupem do modelu jsou otáčky, tj. v tomto případě otáčky spalovacího motoru. Výstupem z modelu jsou tři fázová napětí a vektor s měřenými hodnotami (průběhy statorových proudů, tokotvorné a momentotvorné složky proudu statoru, úhlové natočení rotoru, elektrický moment).

Model PMSG byl naparametrován hodnotami z Tab. 3.4

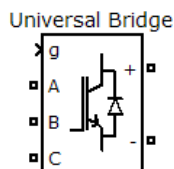
Obr. 3.44 Model PMSG

Tab. 3.4 Parametry PMSG

Jmenovitý zdánlivý výkon S_n	186 kVA
Jmenovité napětí statoru U_n (sdružené)	336 V
Jmenovitý proud fáze statoru I_n	320 A
Jmenovitý účinník $\cos\varphi$	0,86
Jmenovitý mechanický příkon $P_{mech,n}$	171 kW
Jmenovitý moment M_n	907 Nm
Jmenovitá účinnost η_n	0,95
Jmenovitá frekvence f_n	150 Hz
Jmenovité otáčky n_n	1800 1/min
Počet pólů p_p	5
Odpor vinutí fáze statoru R	0,015 Ω
Indukčnost vinutí fáze statoru $L_d = L_q = L$	0,32 mH
Napěťová konstanta k_U	166 V/1000 1/min (napětí sdružené, efektivní)
Moment setrvačnosti J_{GEN}	1,52 kgm^2 (zahrnut do modelu SM)

3.5.2 MODELÝ DALŠÍCH BLOKŮ REGULAČNÍ STRUKTURY MOMENTU A PULZNÍHO USMĚRŇOVAČE

Pulzní usměrňovač

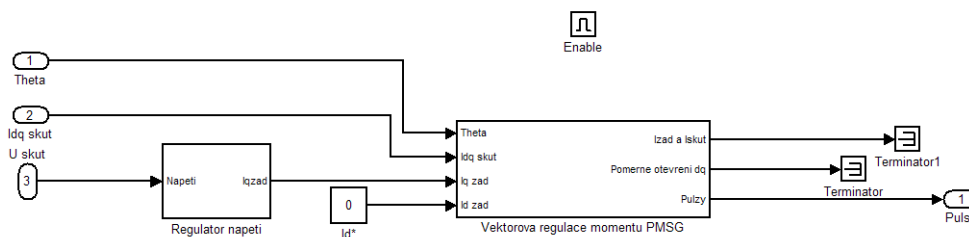


Je použit blok *Universal Bridge* z knihovny SimPowerSystems. Je to plnohodnotný 3 fázový střídač s IGBT tranzistory a nulovými diodami. Odpor v sepnutém stavu tranzistoru byl nastaven na $1\text{ m}\Omega$, rychlost sepnutí/rozepnutí $1\text{ }\mu\text{s}$. Spínací frekvence byla zvolena 3 kHz .

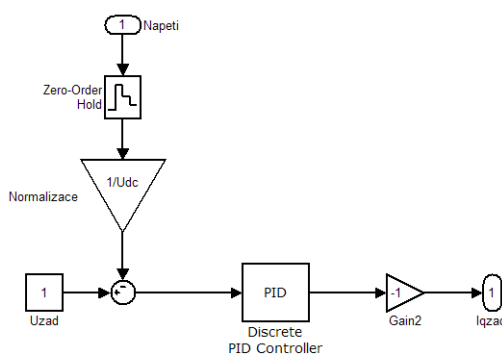
Obr. 3.45 Model pulzního usměrňovače

Regulátor pulzního usměrňovače

Blok regulátoru pulzního usměrňovače obsahuje PID regulátor napětí (Obr. 3.47) a model vektorové regulace momentu PMSG (Obr. 3.48). Režim odbuzování se nepoužívá, proto je žádaná hodnota $i_d^* = 0$.



Obr. 3.46 Model regulátoru pulzního usměrňovače



Obr. 3.47 Regulátor napětí

Měřená hodnota napětí stejnosměrného meziobvodu je porovnávána se žádanou, regulační odchylka je zpracována PID regulátorem jehož výstupem je žádaná hodnota momentotvorné složky statorového proudu. Regulátor pracuje s normalizovanými veličinami.

3.5.3 SIMULACE

Po odladění počítačového simulačního modelu byla provedena řada simulací v ustálených stavech i v dynamických stavech. V dynamických stavech byly sledovány vlastnosti regulace stejnosměrného napětí U_{DC} při změně elektrického zatížení stejnosměrné sběrnice a při změně otáček PMSG. Žádaná hodnota napětí U_{DC} činila 560 V.

Výsledky simulací jsou uvedeny v příloze č. 3.

Z výše uvedeného teoretického rozboru a zejména z výsledků simulací je zřejmé, že soustava PMSG – pulzní usměrňovač je cestou pro stabilizaci napětí stejnosměrné sběrnice el. pohonu hybridního vozidla. Z výsledků simulací vyplývá, že nejvýraznější dynamické jevy vyvolává skokové připojení nebo odpojení zátěže stejnosměrné sběrnice. I tyto dynamické jevy však vyvolávají kolísání napětí U_{DC} jen v jednotkách procent jmenovité hodnoty a jsou v krátkém čase regulační strukturou eliminovány.

3.6 MODEL SOUSTROJÍ SM + ALTERNÁTOR

V simulacích se spojení modelu spalovacího motoru s modelem alternátoru (model regulace U_{DC} skládající se z PMSG, pulzního usměrňovače a regulátoru U_{DC} z Obr. 3.43) ukázalo jako velmi problematické z hlediska výpočetní náročnosti. Jedna sekunda simulačního času trvala 5 minut reálného času, což při simulaci jízdního cyklu o délce trvání 600 s představuje 50 hodin. Simulace byla pomalá díky příliš detailnímu modelu alternátoru.

Z tohoto důvodu byl simulační model alternátoru značně zjednodušen. Pro účely simulací optimálního řízení SM postačuje znát účinnost alternátoru v každém pracovním bodě spalovacího motoru. Účinnost PMSG lze vypočítat jako:

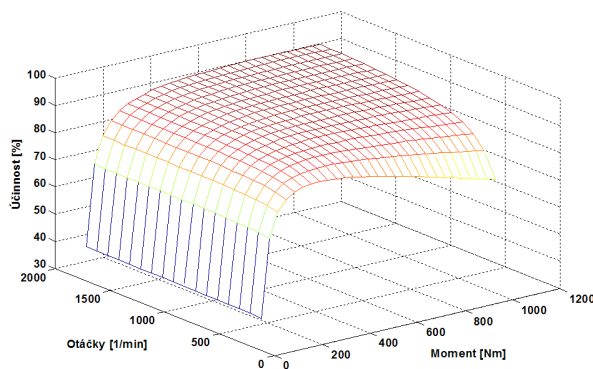
$$\eta_{PMSG} = \frac{P_{el}}{P_{mech}} = \frac{P_{el}}{P_{el} + \Delta P_0 + \Delta P_j} = \frac{P_{el}}{P_{el} + \Delta P_{0n} \cdot \left(\frac{n}{n_n}\right) + \Delta P_{jn} \cdot \left(\frac{M}{M_n}\right)^2} \quad (35)$$

kde: P_{el} - elektrický výkon, P_{mech} - mechanický příkon, ΔP_{0n} - jm. ztráty naprázdno, ΔP_{jn} - jm. Joulovy ztráty, n - otáčky, n_n - jm. otáčky, M - moment, M_n - jmenovitý moment.

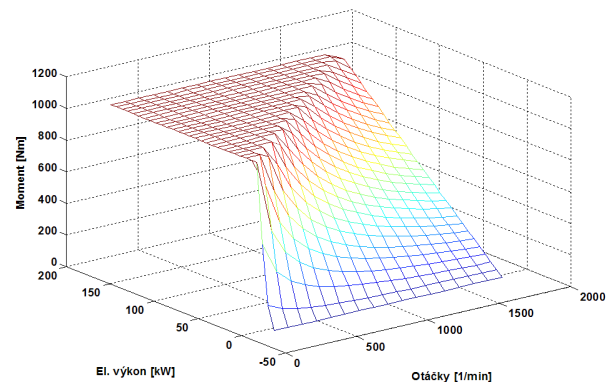
Předpokládá se, že Joulovy ztráty jsou závislé na kvadrátu statorového proudu a tudíž na kvadrátu el. momentu PMSG (rovnice (14)). Ztráty naprázdno jsou lineárně závislé na otáčkách převážně v důsledku závislosti ztrát v magnetickém obvodu stroje na první mocnině frekvence magnetického toku.

Účinnost pulzního usměrňovače byla zvolena konstantní o hodnotě $\eta_{BRIDGE} = 0,98$.

Celková účinnost alternátoru je $\eta_{PMSG+BRIDGE} = \eta_{PMSG} \cdot \eta_{BRIDGE}$.

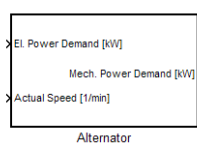


Obr. 3.50 Účinnost PMSG v závislosti na momentu a otáčkách

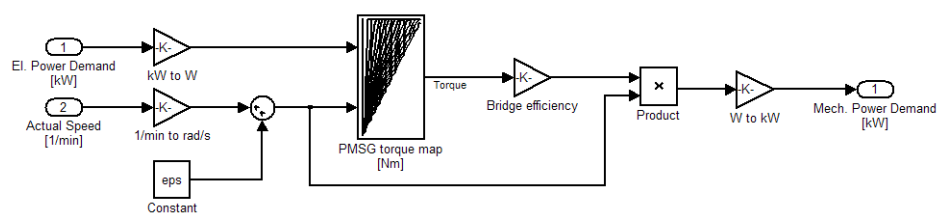


Obr. 3.51 Moment PMSG v závislosti na el. výkonu a otáčkách

Model alternátoru byl zredukován na pouhou 2-D look-up tabulku, ze které je vyčítán mechanický příkon, kterým je zatěžován SM, v závislosti na odebíraném elektrickém výkonu a otáčkách (Obr. 3.52, Obr. 3.53).



Obr. 3.52
Zjednodušený
model alternátoru



Obr. 3.53 Vnitřní struktura zjednodušeného modelu alternátoru

3.6.1 OPTIMÁLNÍ ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTIKA CELÉHO SOUSTROJÍ

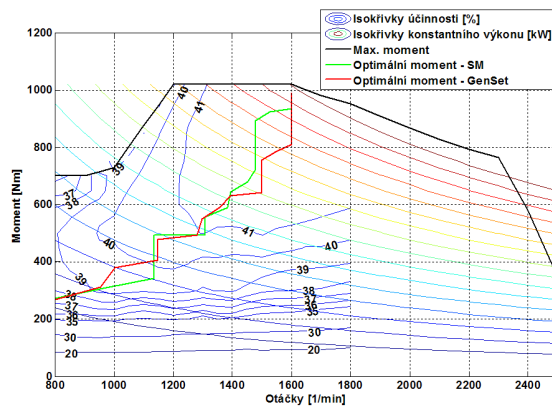
V kapitole 3.1.2 byla uvedena optimální zatěžovací charakteristika (optimální trajektorie) samotného spalovacího motoru, bez uvažování připojeného alternátoru.

Po připojení PMSG k SM lze opět najít optimální pracovní body tohoto celého soustrojí, tj. s uvažováním průběhu účinnosti SM a zároveň účinnosti alternátoru (PMSG + pulzní usměrňovač).

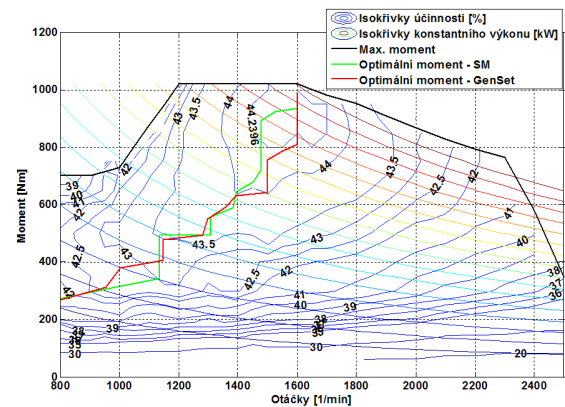
Na Obr. 3.54 je znázorněna charakteristika účinnosti celého soustrojí se zakreslenou optimální trajektorií soustrojí a pro porovnání i se zakreslenou původní optimální trajektorií SM bez připojeného PMSG. Na Obr. 3.55 jsou obě trajektorie zakresleny do charakteristiky účinnosti samotného SM.

Na Obr. 3.56 je pro porovnání zakreslena účinnost samotného SM a účinnost celého soustrojí.

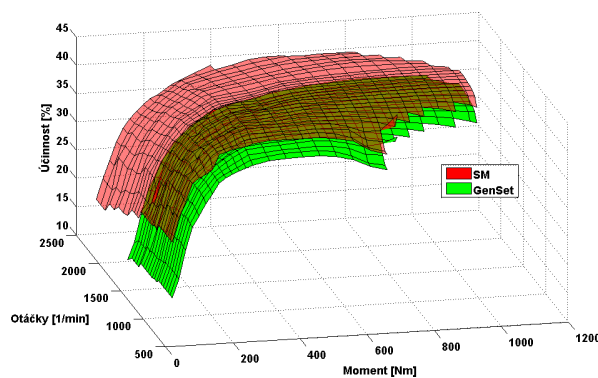
Na Obr. 3.57 je znázorněna optimální trajektorie celého soustrojí v závislosti na výkonu SM.



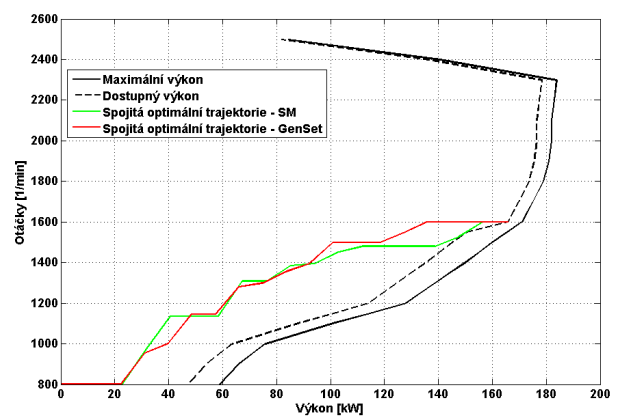
Obr. 3.54 Optimalní trajektorie momentu soustrojí v charakteristice účinnosti soustrojí



Obr. 3.55 Optimalní trajektorie momentu soustrojí v charakteristice účinnosti SM



Obr. 3.56 Porovnání účinnosti samotného SM a celého soustrojí



Obr. 3.57 Průběh optimálních otáček soustrojí (zeleně) v závislosti na výkonu SM

Připojení PMSG s pulzním usměrňovačem k SM se projeví zhoršením účinnosti celého soustrojí vůči samotnému SM, a to v závislosti na přenášeném výkonu. Při maximálním přenášeném výkonu dochází k poklesu účinnosti cca o 3 %, v oblasti velmi nízkého zatížení až o 10 % (Obr. 3.56).

Tvary optimálních trajektorií bez a s uvažováním připojeného PMSG si jsou velice podobné, probíhají téměř stejnými pracovními body. To je dáno velkou podobností tvarů charakteristik účinnosti SM (Obr. 3.4) a PMSG (Obr. 3.50), jejich shodným rysem je nízká účinnost při malém zatížení. Je zřejmé, že rozdíl ve spotřebě paliva při použití trajektorie optimalizované na samotný spalovací motor nebo na spalovací motor ve spojení s generátorem bude minimální.

4. PROVÁDĚNÉ ANALÝZY A ZPŮSOB PROVEDENÍ SIMULACÍ

4.1 PROVÁDĚNÉ ANALÝZY

Seznam provedených analýz:

- Porovnání provozu SM podle „spojité“ optimální trajektorie a „schodovité“ trajektorie v různých jízdních cyklech.
- Zjištění vlivu hystereze u schodovitých trajektorií.
- Zjištění vlivu omezení strmosti žádané hodnoty otáček SM.
- Vliv připojeného el. generátoru – provoz samotného SM bez připojeného el. generátoru a provoz SM s připojeným el. generátorem.

Sledovanými parametry ve všech výše uvedených analýzách jsou spotřeba paliva a produkce emisí NO_x a PM.

V analýzách jsou použity různě optimalizované „optimální“ trajektorie provozu SM (spojitá trajektorie a schodovité optimalizované pro konkrétní jízdní cyklus, určitou hysterezi a otáčkovou rampu).

Analýzy jsou prováděny pomocí simulací, které jsou z důvodu přehlednosti rozděleny do tzv. simulačních scénářů. Detailní popis každé z analýz je uveden v příslušném simulačním scénáři.

Výsledkem provedených analýz jsou doporučení jakým způsobem nejlépe řídit SM, aby bylo dosaženo nejnižší spotřeby paliva nebo malé produkce emisí. Na základě výsledků simulací jsou potvrzeny nebo vyvráceny vyslovené předpoklady v teoretickém rozboru provedeném v kapitole 3.

4.2 ZPŮSOB PROVEDENÍ SIMULACÍ

Vzhledem k tomu, že vstupem do optimalizační jednotky je požadovaný výkon, bylo by nejvhodnější znát časový průběh výkonu, kterým je zatěžován SM. Tento časový průběh výkonu ovšem závisí na řadě faktorů: zvolený algoritmus řízení hybridního pohonu jako celku (řídí rozdělování výkonů), trasa jízdy vozidla, parametry vozidla, odběr pomocných spotřebičů apod.

Pro účely simulace a relativního porovnávání výsledků zvoleny standardizované jízdní cykly u nichž lze průběh výkonu v čase vypočítat. Dle dostupných podkladů k vozidlu byl z trakční rovnice a průběhu rychlosti v čase v jízdním cyklu vypočten časový průběh výkonu v jízdním cyklu. Tento vypočtený výkon je žádanou hodnotou do optimalizační jednotky, dle níž se nastavují otáčky SM.

Výše uvedený způsob reprezentuje situaci, kdy celý trakční výkon dodává SM, který ovšem pracuje v optimálním režimu. Hybridní pohon je v tomto případě v podstatě redukován na diesel-elektrický přenos výkonu. Simulace si nedávají za cíl simulovat provoz hybridního vozidla jako celku, k tomu by bylo třeba sestavit model celého hybridního pohonu. Na jízdní cykly je tudíž vhodné pohlížet spíše jako na definovaný průběh výkonu v čase, který lze popsat určitými parametry (střední hodnota, směrodatná odchylka, histogram hodnot výkonu v jízdním cyklu a podobně), a který lze využít pro nalezení optimální trajektorie provozu SM.

Parametry vozidla

Parametry vozidla v simulacích byly nastaveny dle dokumentace k reálnému vozidlu. Účinnost přenosu výkonu ze SM na kola byla uvažována jednotková.

Tab. 4.1 Parametry vozidla použité v jízdních cyklech SORT a NYCC

Hmotnost vozidla	12 600 pohotovostní + 7000 užitečná = 19 600 kg celková
c_0 - koeficient jízdního odporu u v^0	0,014925 N/N
c_2 - koeficient jízdního odporu u v^2	0,235098 N/(km/h) ²
Součinitel rotujících hmot	1,035
Tíhové zrychlení	9,81 m/s ²
Účinnost přenosu výkonu SM → kolo	1

Na základě parametrů vozidla a vybraného jízdního cyklu mohl být vypočten žádaný výkon SM.

Trakční síla:

$$F_{tr}[N] = m \cdot g \cdot c_0 \cdot \cos(\alpha) + m \cdot g \cdot \sin(\alpha) + c_2 \cdot v^2 + m \cdot d \cdot \frac{dv}{dt} \quad (36)$$

se skládá ze složky valivého odporu, odporu do stoupání, odporu vzduchu a setrvačného odporu.

Trakční výkon:

$$P_{tr}[N] = F_{tr} \cdot v \quad (37)$$

Kde: m – hmotnost vozidla [kg],

g – tíhové zrychlení [m/s²],

c_0 - koeficient jízdního odporu u v^0 [N/N],

α - úhel stoupání, pokud není uvedeno jinak, byla v simulacích uvažována jízda po rovině, tedy sklon 0°,

c_2 - koeficient jízdního odporu u v^2 [N/(m/s)²],

v – rychlost vozidla [m/s],

d – součinitel ekvivalentní hmotnosti rotujících částí [-]

Univerzita Pardubice Dopravní fakulta Jana Pernera	Dizertační práce	82
---	------------------	----

4.2.1 ODBĚR POMOCNÝCH SPOTŘEBIČŮ

Ve všech simulacích je k trakčnímu výkonu z jízdního cyklu přičítán konstantní výkon 5,1 kW, který představuje odběr pomocných elektrických, případně i mechanických spotřebičů připojených k SM.

Pod pojmem spotřebič se míní: osvětlení, vzduchový kompresor, klimatizace apod.

Ke zvolení konkrétní hodnoty 5,1 kW vedly tyto faktory:

- Úplná charakteristika SM nezahrnuje odběr spotřebičů (kompresoru, alternátoru, větráku chladiče).
- První bod v úplné charakteristice SM začíná na otáčkách 800 1/min a momentu 60 Nm, tomu odpovídá výkon 5,024 kW.
- Pokud je zatížení SM menší než 5,024 kW, není výpočet spotřeby paliva v modelu přesný, protože chybí údaje v originální palivové mapě. Místo toho se vyčítá údaj z extrapolované oblasti v extrapolované palivové mapě, přesnost této hodnoty ovšem není zaručena.
- Alternátory používané na autobusech mají parametry 28V/100 až 180 A, průměrnou účinnost cca 70 %. Tomu odpovídá mechanický příkon 4 kW až 7,2 kW při plném zatížení alternátoru.
- Výsledky orientačního praktického měření na autobusu MHD s motorem Iveco Cursor 7.8 litru ukázaly zatížení SM ve volnoběhu od cca 0,8 kW do 3 kW a tomu odpovídající hodinovou spotřebu paliva 1,6 až 2,3 litru.

Díky tomu hodinová spotřeba paliva při volnoběžných otáčkách a nulovém trakčním výkonu (vozidlo stojí) vychází v modelu reálných **2,06 l/h** při odběru pomocných spotřebičů **5,1 kW**.

Pokud je odběr pomocných spotřebičů nastaven na **0 kW** (SM není vůbec ničím zatížen, pouze překonává své vnitřní pasivní odpory), je spotřeba paliva ve volnoběhu cca **1,17 l/h**. Tato hodnota je také velmi reálná.

4.2.2 SLEDOVANÉ VELIČINY

Hlavní sledované veličiny ve všech simulačních scénářích byly spotřeba paliva a emise NO_x a PM, které jsou u vznětového motoru nejkritičtější. Vzhledem k tomu, že různé jízdní cykly kladou různé požadavky na výkon a díky tomu se mění rozložení pracovních bodů v charakteristice motoru, je obtížné zvolit vhodné ukazatele, nezávislé na tvaru jízdního cyklu.

Z tohoto důvodu jsou ve všech simulacích zavedeny poměrné jednotky, aby bylo možné porovnávat výsledky z různých jízdních cyklů:

- Spotřeba paliva [litrů/100km] – spotřeba paliva vztažena k délce jízdního cyklu.
- Měrná spotřeba paliva [g/kWh] – celková spotřeba paliva [g] v jízdním cyklu vztažená vůči celkové odevzdané práci motoru, pro posouzení využití energie v palivu.
- Produkce emisí NO_x a PM [g/kWh] – vztažení produkce na celkovou práci spalovacího motoru za jízdní cyklus umožňuje porovnání nejen napříč jízdními cykly, ale i s limity evropských emisních norem EURO.

4.2.3 JÍZDNÍ CYKLY

Pro simulace byly zvoleny standardizované jízdní cykly SORT pro autobusy a jeden jízdní cyklus pro osobní vozidla (NYCC). Jízdní cykly SORT jsou syntetické, byly sestaveny komisí UITP na základě analýz reálných jízdních cyklů autobusů.

Tab. 4.2 Parametry jízdních cyklů

Název	Doba trvání [s]	Ujetá vzdálenost [km]	Maximální rychlost [km/h]	Průměrná rychlost [km/h]	Směrodatná odchylka rychlosti [km/h]	Maximální zrychlení [km/h/s]	Čas strávený ve volnoběhu [%]	Počet zastávek na jeden kilometr
SORT 1	155,8	0,52	40	12,0	17,75	3,71	38,6	5,8
SORT 2	183,9	0,92	50	18,0	18,40	3,71	32,6	3,3
SORT 3	206,2	1,45	60	25,3	20,07	2,77	19,4	2,1
EPA NYCC	598	1,89	44,6	11,4	12,83	9,65	32,3	9,5

Tab. 4.3 Výkonové parametry jízdních cyklů

Název	Maximální výkon [kW]	Průměrný* výkon [kW]	Směrodatná* odchylka výkonu [kW]	Maximální kladná* derivace výkonu [kW/s]	Průměrná kladná* derivace výkonu [kW/s]
SORT 1	174,5	21,8	38,1	24,8	11,8
SORT 2	207,3	31,4	48,2	24,8	10,8
SORT 3	216,6	44,5	56,4	14,7	8,1
EPA NYCC	412,8	25,1	54,9	233,6	27,0

* Počítáno pouze z kladných hodnot výkonu v jízdním cyklu

Americký jízdní cyklus EPA NYCC (New York City Cycle) je určen pro osobní vozidla. Je sem zařazen záměrně vzhledem k jeho velmi odlišnému průběhu a parametrům oproti jízdním cyklům SORT. NYCC cyklus je velmi transientní, obsahuje úseky s prudkými zrychleními, častými rozjezdy a zastaveními.

Naproti tomu jízdní cykly SORT jsou určeny přímo pro autobusy. SORT 1 má simulovat jízdu v těžkém městském provozu s častými zastaveními a malou průměrnou rychlostí. SORT 2 je simulace lehkého městského provozu (vyšší průměrná rychlost) a SORT 3 má představovat příměstský provoz s menším počtem zastávek a vyšší průměrnou rychlostí. Cykly obsahují vždy úsek s konstantním zrychlením následovaný jízdou s konstantní rychlostí, poté následuje zpomalení do zastavení. Tyto trapézy jsou v každém jízdním cyklu SORT celkem 3 a jsou odděleny zastávkami. Setrvání v zastávce je buď 10 nebo 20 s, dle cyklu. Zastávky zabírají poměrně velké množství celkového času jízdního cyklu.

Použitá metrika u jízdních cyklů

Průměrná rychlost

$$\bar{v} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n} \quad (38)$$

Kde: n – celkový počet datových bodů v jízdním cyklu

Do výpočtu průměrné rychlosti jsou zahrnuty i úseky, kdy vozidlo stojí.

Směrodatná odchylka rychlosti

$$s_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2}{n-1}} \quad (39)$$

Zrychlení v čase i

$$a(i) = \frac{(v_{i+1} - v_i)}{3,6 \cdot (t_{i+1} - t_i)} \quad (40)$$

Maximální zrychlení

$$a_{\max} = \max\left(\{a(i)\}_{i=1}^n\right) \quad (41)$$

Čas strávený ve volnoběhu

$$\% \text{ ve volnoběhu} = 100 \cdot \frac{\text{počet datových bodů s rychlostí } 0 \text{ km/h}}{\text{celkový počet datových bodů}} \quad (42)$$

Je vypočten jako počet datových bodů s nulovou rychlostí dělený celkovým počtem bodů, násobeno stem.

Univerzita Pardubice Dopravní fakulta Jana Pernera	Dizertační práce	85
---	------------------	----

Počet zastávek na jeden kilometr

$$\text{počet zastávek/km} = \frac{\text{počet zastávek}}{\text{délka jízdního cyklu}} \quad (43)$$

Počet úseků s rychlostí 0 km/h podělený ujetou vzdáleností. Úvodní rozjezd z nulové rychlosti se nepočítá. Délka zastávky není zohledněna.

Průměrný výkon

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n} \quad \text{pokud } P_i > 0 \quad (44)$$

Při výpočtu se bere v úvahu pouze kladný výkon, protože se uvažuje, že při zpomalování motor nepotřebovává žádné palivo.

Směrodatná odchylka výkonu

$$s_P = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}{n-1}} \quad \text{pokud } P_i > 0 \quad (45)$$

Při výpočtu se bere v úvahu pouze kladný výkon, protože se uvažuje, že při zpomalování motor nepotřebovává žádné palivo.

Derivace výkonu v čase i

$$P'(i) = \frac{(P_{i+1} - P_i)}{(t_{i+1} - t_i)} \quad (46)$$

Do výpočtu derivace vstupuje pouze kladný výkon, záporné hodnoty jsou ve vektoru P_i nahrazeny nulami. V případě výpočtu zrychlení u jízdního cyklu NYCC byl časový průběh výkonu před vstupem do výpočtu derivace nejprve filtrován. Byl použit filtr Savitzky-Golay 2. řádu s filtračním oknem o šíři 21 hodnot (2,1 sekundy). Tento typ filtru aplikuje na data lokální polynomiální regresi a oproti filtrům typu jednoduchý klouzavý průměr poskytuje lepší výsledky. Vyfiltrovaný průběh si zachovává tvar velmi podobný původnímu signálu, ale již bez šumu.

Maximální kladná derivace výkonu

$$P'_{\max} = \max \left(\{P'(i)\}_{i=1}^n \right) \quad (47)$$

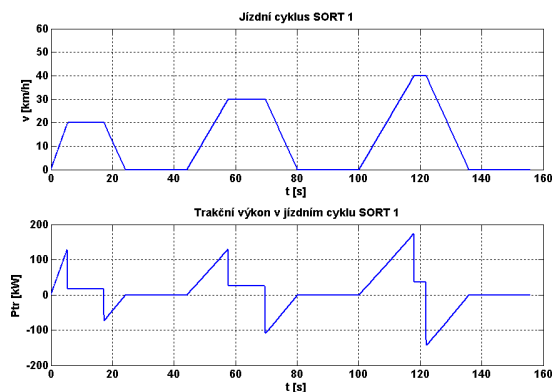
Průměrná kladná derivace výkonu

$$\bar{P}' = \frac{\sum_{i=1}^n P'_i}{k} \text{ pokud } P'_i > 0 \quad (48)$$

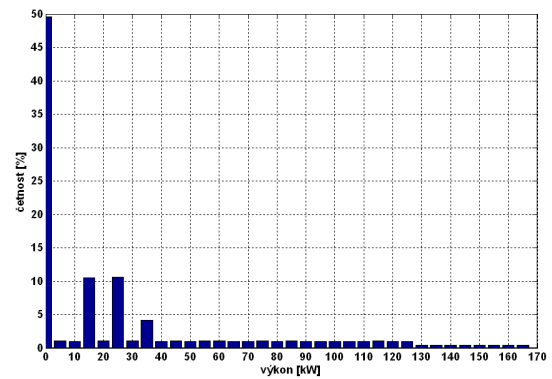
Kde: k – počet kladných derivací výkonu

Průměrná kladná derivace výkonu reprezentuje průměrný nárůst (strmost) výkonu v jízdním cyklu. Do výpočtu vstupují pouze kladné hodnoty derivací. Celková suma kladných derivací je podělena jejich počtem k , nikoliv celkovým počtem datových hodnot n v jízdním cyklu.

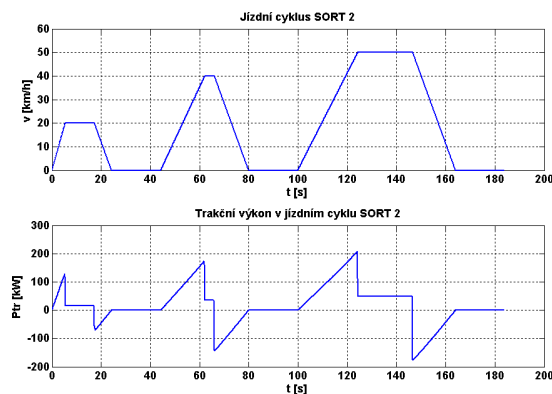
Časové průběhy jízdních cyklů



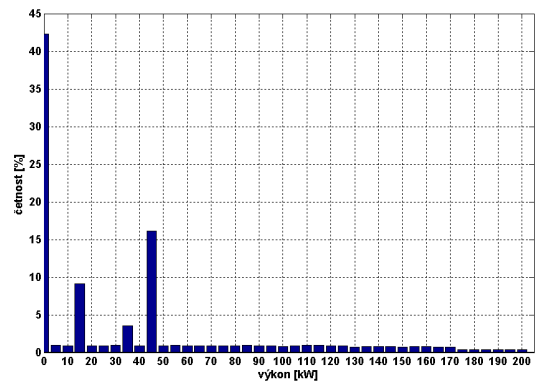
Obr. 4.1 Jízdní cyklus SORT 1



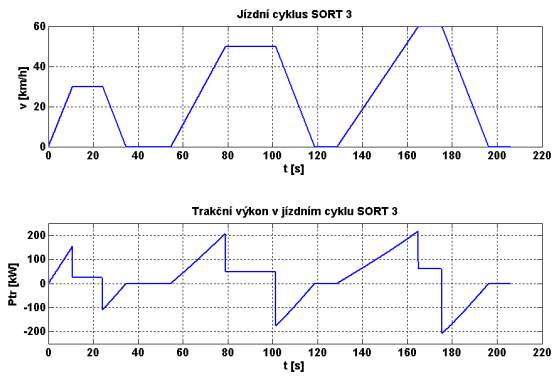
Obr. 4.2 Histogram výkonů v jízdním cyklu SORT 1



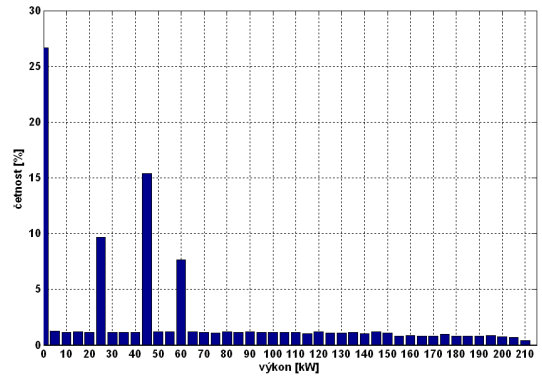
Obr. 4.3 Jízdní cyklus SORT 2



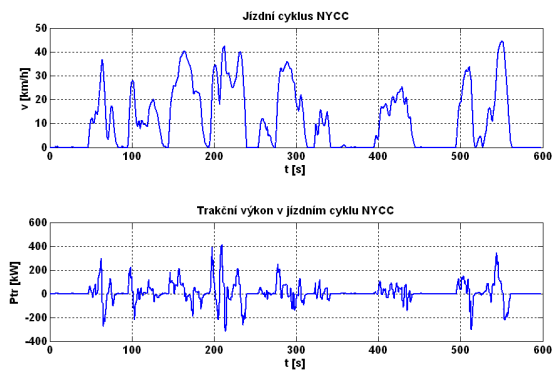
Obr. 4.4 Histogram výkonů v jízdním cyklu SORT 2



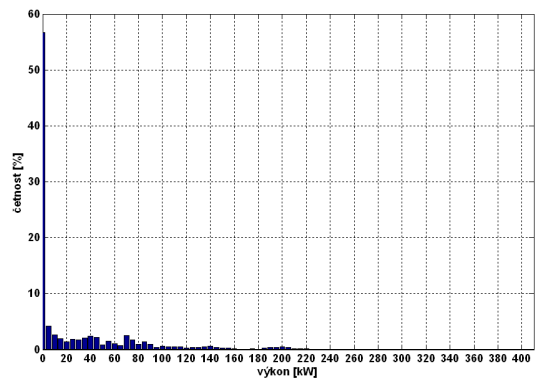
Obr. 4.5 Jízdní cyklus SORT 3



Obr. 4.6 Histogram výkonů v jízdním cyklu SORT 3



Obr. 4.7 Jízdní cyklus NYCC



Obr. 4.8 Histogram výkonů v jízdním cyklu NYCC

V histogramech jsou zobrazeny pouze kladné hodnoty výkonů v jízdním cyklu.

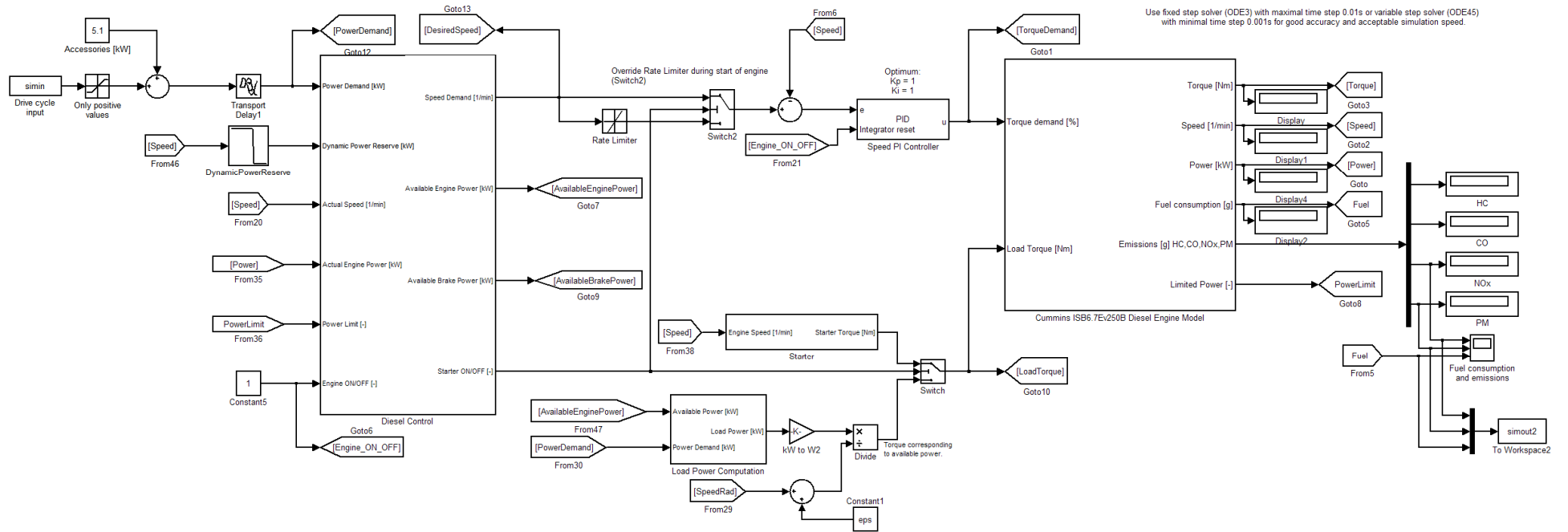
5. SIMULACE CHODU SAMOTNÉHO SPALOVACÍHO MOTORU

Nejprve byly provedeny simulace zaměřené pouze na optimální chod samotného SM bez připojeného el. generátoru a pulzního usměrňovače.

Účel simulací:

1. Porovnání spotřeby paliva za jízdní cyklus vozidla při použití různých trajektorií provozu spalovacího motoru v rovině výkon – otáčky (spalovací motor může pracovat při stejném výkonu při různých otáčkách). Určení nejoptimálnější z nich pro vybraný jízdní cyklus.
2. Zjištění vlivu použitého jízdního cyklu na spotřebu paliva a emise u různých typů „optimálních“ trajektorií a zjištění rozdílů mezi trajektoriemi optimalizovanými pro konkrétní jízdní cyklus. Byly použity standardizované jízdní cykly SORT 1, SORT 2, SORT 3 pro autobusy + jízdní cyklus NYCC (New York City Cycle) pro osobní vozidla.
3. Zjištění vlivu velikosti hystereze výkonu při přechodu na jiné otáčky na spotřebu paliva a emise.
4. Zjištění vlivu omezení strmosti žádané hodnoty otáček vstupující do regulátoru otáček na spotřebu paliva a emise.
5. Ověření provozu SM v režimu „Stop and Go“.

5.1 SIMULAČNÍ MODEL



Obr. 5.1 Blokové schéma simulačního modelu

Univerzita Pardubice Dopravní fakulta Jana Pernera	Dizertační práce	90
---	------------------	----

5.1.1 POPIS SIMULAČNÍHO MODELU

Simulační model (Obr. 5.1) se skládá z 5 základních bloků a vazeb mezi nimi.

Diesel Engine Model

Model spalovacího motoru.

Diesel Control

Optimalizační jednotka pro řízení SM.

Speed PI Controller

Reguluje otáčky SM na základě žádané hodnoty otáček, která je výstupem z optimalizační jednotky, respektive z bloku *Rate Limiter*, který zde představuje otáčkovou rampu. Otáčková rampa je žádoucí, aby otáčkový regulátor nepracoval se skoky žádané hodnoty, což vyvolává nežádoucí prudké změny akční veličiny (polohy plynu).

Sklon otáčkové rampy je v simulacích nastaven na ± 500 1/min/s, pokud není uvedeno jinak.

PI regulátor má externí vstup pro reset integrační složky. Reaguje na jakoukoliv hranu signálu. Integrátor je vyresetován vždy při startování nebo vypínání motoru. Toto opatření je nutné.

Accessories

Jedná se o blok typu konstanta. Nastavuje se jím odběr výkonu pomocných spotřebičů (ventilátor, kompresor, alternátor, klimatizace apod.). V simulačním modelu je nastaven na konstantní hodnotu 5,1 kW, pokud není uvedeno jinak.

Load Power Computation

Slouží pro výpočet zatěžovacího výkonu, kterým je v každém okamžiku skutečně zatěžován SM. V bloku je implementována následující jednoduchá podmínka:

Pokud: „Available Power“ \geq „Power Demand“

Pak: „Load Power“ = „Power Demand“ - není limitace výkonu

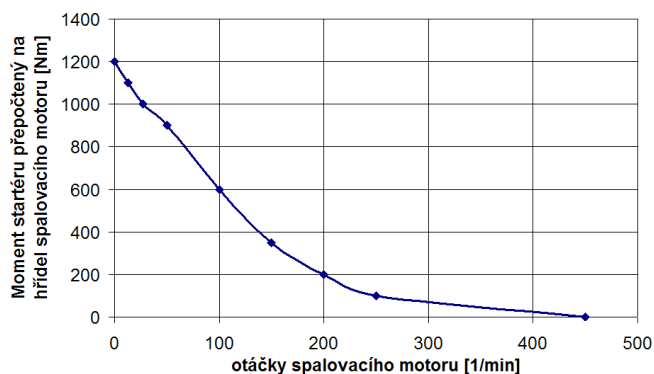
Jinak: „Load Power“ = „Available Power“ - je limitace výkonu

Pokud je dostupný výkon SM („Available Engine Power“) menší než žádaný výkon z jízdního cyklu („Power Demand“), je SM zatížen tak, aby nebyl přetížen, tj. SM je zatěžován jen dostupným výkonem. Pokud je dostupný výkon vyšší než žádaný, není nutné zatěžovací výkon limitovat. V tomto případě je zatěžovací výkon je roven žádanému.

Tuto logiku bude muset v reálném hybridním vozidle obsahovat nadřazený systém řízení, aby nedocházelo k přetížení SM.

Startér

Je model startéru. Jeho výstupem je záporný moment pro startování SM. Vstupem do bloku startéru jsou otáčky SM.



Obr. 5.2 Momentová charakteristika startéru AZF45 (přečtená na hřídel SM, převodový poměr 10:1)

modelu byla použita hodnota převodového poměru 10:1.

Startéry pro vznětové motory o objemech řádově 4 až 12 litrů mají většinou výkon 4 – 6 kW a jsou schopné vyvinout moment na hřídeli až 120 Nm [40]. Moment startéru je násoben převodovým poměrem startér-SM (obvykle 8 až 16, do pomala), takže moment přečtený na hřídel SM činí řádově stovky Nm.

V modelu startéru je použita momentová charakteristika startéru typu AZF45 (24V/4kW) od výrobce ISKRA-AGV [40]. Startér se chová jako stejnosměrný sériový motor. Simulační

5.1.2 STARTOVÁNÍ SM

Je řešeno přivedením záporného zatěžovacího momentu do vstupu „Load Torque“ modelu SM na definovanou dobu.

Startovací zařízení musí dodat dostatečně velký moment, aby došlo k překonání třecího momentu SM. Ten roste s kvadrátem otáček, při nulových otáčkách dosahuje necelých 65 Nm. Tudíž minimální moment startovacího zařízení musí být 65 Nm nebo větší.

Při startování (obecně ve stavu kdy vnější zařízení roztáčí SM) **musí být zatěžovací moment** přiváděný do vstupu „Load Torque“ **záporný**.

Podmínky aktivace SM

1. Vstup „Engine ON/OFF“ = 1 jednotky *Diesel Control*.
2. Otáčky SM větší než startovací (120 1/min)

Po splnění těchto podmínek je aktivováno vstřikování paliva v modelu SM.

Model umožňuje startování dvojitým způsobem:

- Pomocí startéru, který je součástí reálného SM.
- Pomocí el. generátoru, který je na společné hřídeli se SM.

Ve všech simulacích, pokud není uvedeno jinak, je používán start pomocí startéru.

Konkrétní postup startování SM je uveden v příloze č. 2.

5.2 SCÉNÁŘ Č. 1 - SPOTŘEBA PALIVA V JEDNOM JÍZDNÍM CYKLU U RŮZNÝCH TRAJEKTORIÍ

Tento simulační scénář se zabývá porovnáním dosažených spotřeb paliva za jízdní cyklus vozidla s různými optimálními trajektoriemi provozu spalovacího motoru. Všechny trajektorie byly optimalizovány na minimální měrnou spotřebu paliva.

Vzhledem k předpokládanému použití schodovité trajektorie na reálném vozidle, je účelné dále optimalizovat výchozí schodovitou trajektorii (Obr. 3.12), simulacemi ověřit dosaženou spotřebu paliva a porovnat jí s optimální spojitou trajektorií (Obr. 3.8).

Optimalizace byly provedeny jízdní cyklus SORT 2.

Nastavení simulace u všech zkoumaných trajektorií:

- Jízdní cyklus SORT 2
- Odběr spotřebičů konstantních 5,1 kW
- Dynamická korekce emisí v modelu SM zapnuta
- Konstanty PI regulátoru otáček SM: $K_p = 1$, $K_i = 1$
- Omezení strmosti žádané hodnoty otáček do regulátoru otáček na ± 500 1/min/s
- Rezerva maximálního výkonu = 3 % z aktuální hodnoty max. výkonu při daných otáčkách
- Rezerva na dynamický výkon = 10 kW (konstantní, nezávislá na pracovním bodě)
- Hystereze výkonu = 10 kW (konstantní, nezávislá na pracovním bodě) – pouze u schodovitých trajektorií

Předmětem testu jsou celkem 4 trajektorie:

1. Spojitá - Obr. 3.8
2. Schodovitá - Obr. 3.12
3. a 4. Dvě modifikace výchozí schodovité trajektorie z bodu 2) – modifikace počtu použitých provozních hodnot otáček, mezi kterými SM přechází dle žádaného výkonu, modifikace šířky výkonových intervalů (modifikace hodnoty výkonu, při které SM přechází do sousedního výkonového intervalu, tj. na jiné otáčky).

5.2.1 VÝSLEDKY SIMULACÍ

Tab. 5.1 Scénář č. 1 – spotřeba paliva, jízdní cyklus SORT 2

č.	Typ trajektorie	Provedená úprava	Popis tvaru trajektorie	Spotřeba paliva za jízdní cyklus [g]	Spotřeba paliva [l/100km]
1	spojitá	-	spojitá změna otáček s výkonem	375,16	49,130
2	schodovitá výchozí	-	<u>4 výkonové intervaly:</u> 0 – 22,85 kW při 800 1/min 22,85 – 68,41 kW při 1136 1/min 68,41 – 120 kW při 1308 1/min 120 – 171 kW při 1600 1/min	378,36	49,550
3	schodovitá upravená dynamicky (vychází z č.2)	optimalizace šířek výkonových intervalů a jejich otáček	<u>4 výkonové intervaly:</u> 0 – 27 kW při 800 1/min 27 – 59 kW při 1100 1/min 59 – 135kW při 1500 1/min 135 – 171 kW při 1600 1/min	377,26	49,405
4	schodovitá upravená dynamicky (vychází z č.2)	přidán 1 výkonový interval, optimalizace šířek výkonových intervalů a jejich otáček	<u>5 výkonových intervalů:</u> 0 – 27 kW při 800 1/min 27 – 59 kW při 1100 1/min 59 – 79 kW při 1300 1/min 79 – 135 kW při 1500 1/min 135 – 171 kW při 1600 1/min	377,18	49,395

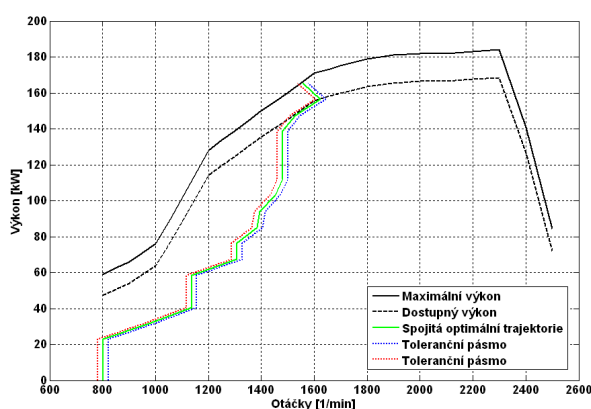
Tab. 5.2 Scénář č. 1 - produkce emisí a další ukazatele, jízdní cyklus SORT 2

č.	Spotřeba paliva za jízdní cyklus [g]	Spotřeba paliva [l/100km]	Rozdíl vůči trajektorii č. 1 [%]	Produkce NO _x [g/kWh]	Produkce PM [g/kWh]	Četnost pracovních bodů SM v optimální oblasti [%]	Spotřeba paliva v optimální oblasti [%]
1	375,16	49,130	0,00	4,209	0,0523	91,00	87,20
4	377,18	49,395	0,54	4,112	0,0523	71,70	54,80
3	377,26	49,405	0,56	4,11	0,0525	70,44	52,36
2	378,36	49,550	0,85	4,227	0,0524	76,24	57,36

Popis ukazatelů v Tab. 5.2

Hodnoty v tabulce jsou seřazeny vzestupně od nejnižší po nejvyšší spotřebu paliva. Červeně je označena neoptimálnější schodovitá trajektorie s ohledem na co nejnižší spotřebu paliva. Černě pak výchozí schodovitá trajektorie před optimalizací.

Četnost pracovních bodů SM v optimální oblasti je vztažena vůči spojitě trajektorii, která je zde považována za etalon. Kdyby SM pracoval tak, že všechny jeho pracovní body budou ležet na této trajektorii, bude dosaženo minimální spotřeby paliva, menší dosáhnout nelze. Šířka pásma, ve kterém je pracovní bod považován za optimální, byla nastavena na ± 20 1/min okolo spojitě trajektorie (Obr. 5.3). Tímto způsobem lze snadno zhodnotit kolik času trávil SM v optimální oblasti s nejnižší spotřebou paliva u všech použitých trajektorií. Pokud pracovní bod padne do optimální oblasti, je označen za optimální, pokud nikoliv, je označen za neoptimální.



Obr. 5.3 Toleranční pásmo pro vyhodnocení četnosti optimálních pracovních bodů SM

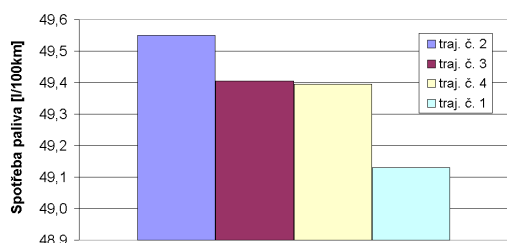
Dalším vypovídajícím ukazatelem je množství paliva spotřebovaného v optimální oblasti. Udává jaká procentuální část spotřeby paliva připadá na práci v optimálních pracovních bodech, tj. v blízkém okolí spojitě trajektorie. Čím je toto číslo vyšší, tím delší dobu pracoval SM v oblastech s minimální měrnou spotřebou paliva, respektive s vyšší účinností.

Tato použitá metrika není dokonalá, velké rozdíly v četnostech optimálních pracovních bodů nemusí znamenat velké rozdíly ve spotřebě paliva. Poskytuje ale představu o pracovních oblastech motoru v jízdním cyklu.

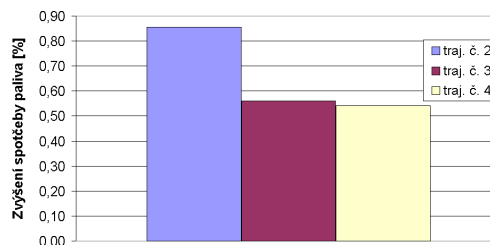
Vyhodnocení výsledků

Spotřeba paliva

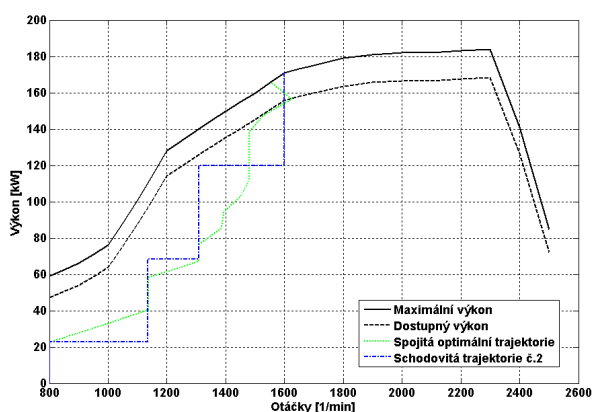
Nejnižší spotřeby paliva [l/100km] bylo dosaženo se spojitou trajektorií. Při aproximaci spojitě trajektorie schodovitou č. 2 dojde k mírnému navýšení spotřeby cca o 0,85 %, protože SM pracuje delší dobu mimo optimální oblast, jak dokazuje pokles procentuální spotřeby paliva v optimální oblasti v Tab. 5.2.



Obr. 5.4 Spotřeba paliva v jízdním cyklu SORT 2 dle použité trajektorie



Obr. 5.5 Zvýšení spotřeby paliva vůči spojitě optimální trajektorii č. 1 v jízdním cyklu SORT 2 dle použité schodovité trajektorie



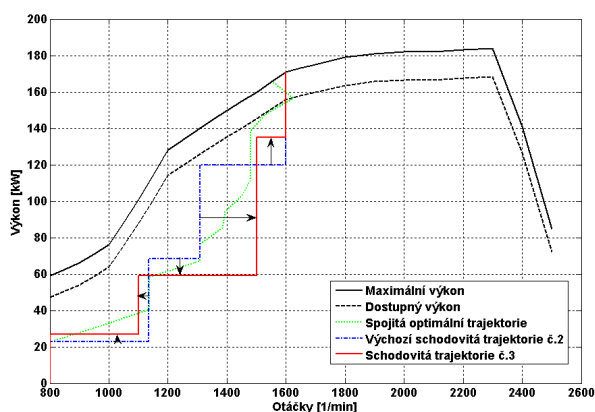
Obr. 5.6 Spojitá a výchozí schodovitá trajektorie č. 2

Výchozí schodovitá trajektorie č. 2 byla dále optimalizována. Výsledkem optimalizací jsou trajektorie č. 3 a č. 4 u nichž došlo ke snížení spotřeby paliva. Snížení spotřeby, ale nebylo u obou optimalizovaných trajektorií příliš výrazné, řádově několik desetin procent.

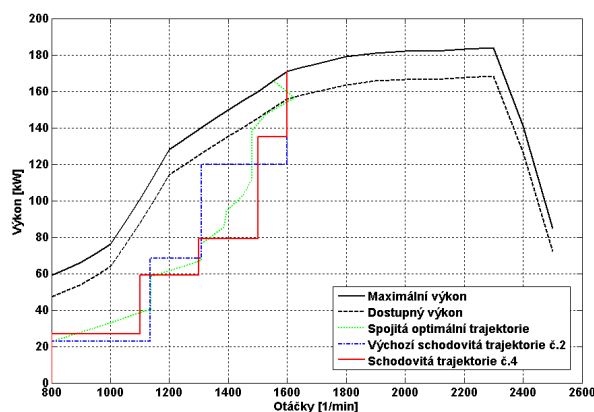
Největšího snížení spotřeby paliva (-0,31 % vůči výchozí schodovité trajektorii č. 2) bylo dosaženo u optimalizované schodovité trajektorie č. 4, která se tak stala nejlepší ze schodovitých v jízdním cyklu SORT 2.

Úroveň spotřeby paliva jako u spojitě trajektorie ovšem nebylo dosaženo. I přesto, že doba strávená v optimální oblasti, respektive množství paliva spotřebované v optimální oblasti, je u schodovitých trajektorií výrazně nižší než u spojitě, na celkové spotřebě paliva se tento jev příliš neprojevuje.

Schodovitá trajektorie č. 3 vznikla optimalizací výchozí schodovité trajektorie č. 2, počet intervalů výkonu byl zachován, Obr. 5.7.



Obr. 5.7 Optimalizovaná schodovitá trajektorie č. 3

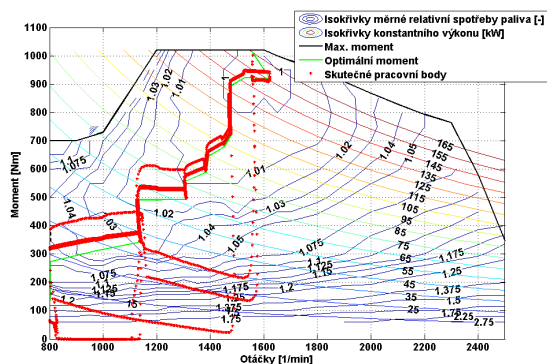


Obr. 5.8 Optimalizovaná schodovitá trajektorie č. 4

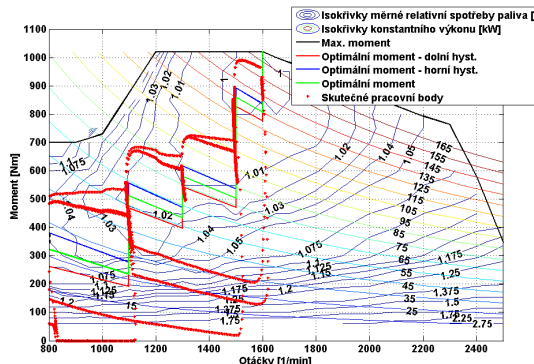
U schodovité trajektorie č. 4 (Obr. 5.8) byl přidán jeden interval výkonu v oblasti otáček 1500 1/min a celá trajektorie byla opět zoptimalizována. Přidání jednoho intervalu navíc bylo pozitivní a vedlo k dalšímu mírnému snížení spotřeby paliva.

Z optimalizací vyplývá, že průběh výchozí schodovité trajektorie č. 2 byl navržen velmi dobře, neboť její modifikace během optimalizačního procesu nebyly velké. Otáčky v jednotlivých intervalech zůstaly téměř stejné, pouze došlo k úpravám šířek intervalů výkonu. Při počáteční konstrukci schodovité trajektorie se intervaly výkonu s konstantními otáčkami umístily do zlomů (nespojivosti) spojitě trajektorie, které lze pozorovat při otáčkách 800, 1136, 1308 a 1480 1/min. To se nyní ukázalo jako správné.

Byl vyvrácen předpoklad možné úspory paliva tím, že při použití schodovité trajektorie nemusí SM neustále měnit své otáčky dle požadovaného výkonu. Nárůst spotřeby paliva u schodovité trajektorie je způsoben tím, že SM pracuje dlouhodobě v pracovních bodech příliš vzdálených od optimální oblasti (porovnej Obr. 5.9 s Obr. 5.10). SM sice pracuje při konstantních otáčkách, ale spotřeba paliva v těchto pracovních bodech je vyšší než spotřeba paliva v přechodovém stavu u spojitě trajektorie.



Obr. 5.9 Pracovní body momentu v jízdním cyklu (spojitá trajektorie č. 1)



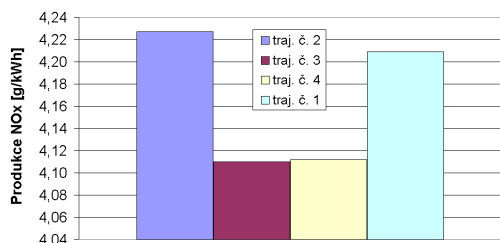
Obr. 5.10 Pracovní body momentu v jízdním cyklu (schodovitá trajektorie č. 4)

Nahrazením optimální spojitě trajektorie schodovitou dojde k mírnému zvýšení spotřeby paliva, které je ovšem zanedbatelné (do 1 %). K tomu velkou měrou přispívá tvar úplné charakteristiky SM, ve které se vyskytuje velká oblast výkonů s takřka neměnnou měrnou spotřebou paliva. Odchytky pracovních bodů SM od optimální oblasti pak téměř nemají vliv na celkovou spotřebu paliva.

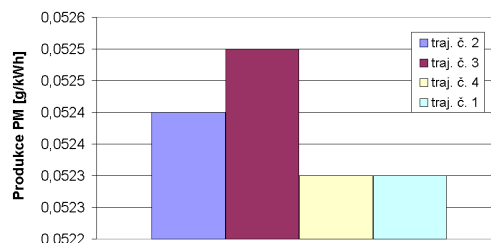
Vzhledem k zanedbatelným úsporám paliva, které optimalizace schodovitých trajektorií přinesla, lze prohlásit, že lze použít jakoukoliv ze zde uvedených schodovitých trajektorií, tj. č. 2, 3 nebo 4, přičemž č. 4 je nejlepší.

Emise

Co se týče produkce emisních složek NO_x a pevných částic, bylo dosaženo u všech trajektorií takřka stejných hodnot.



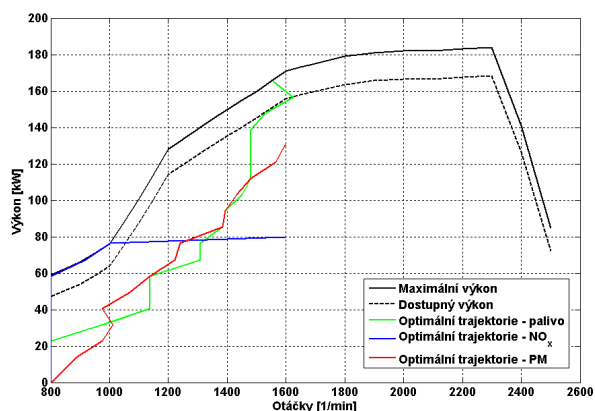
Obr. 5.11 Produkce NO_x v jízdním cyklu SORT 2 dle použité trajektorie



Obr. 5.12 Produkce PM v jízdním cyklu SORT 2 dle použité trajektorie

Jak vyplývá z výsledků (Obr. 5.11, Obr. 5.12), produkci emisí NO_x a PM se u neoptimálnější schodovité trajektorie č. 4 podařilo snížit vůči výchozímu stavu (č. 2) i vůči

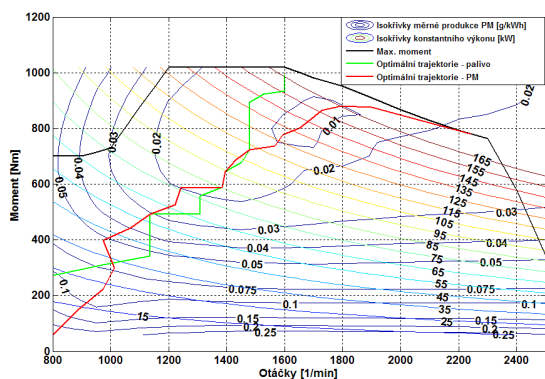
optimální spojité trajektorii č. 1. Ta je sice neoptimálnější ze všech s ohledem na spotřebu, nikoliv však na emise.



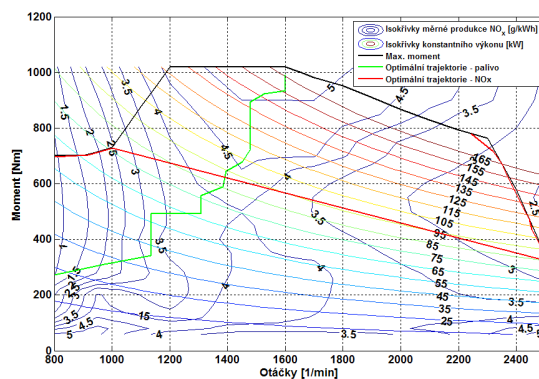
Obr. 5.13 Různé průběhy optimálních trajektorií dle typu optimalizované veličiny

To je způsobeno protichůdnými požadavky při optimalizaci, jak vyplývá z teorie i praktických experimentů [20], [2],[3]. Oblasti, ve kterých dosahuje měrná spotřeba minima se nepřekrývají s oblastmi, ve kterých je dosaženo minimální produkce NO_x nebo PM. Pokud by zněl hlavní požadavek snížit emise NO_x nebo PM, musela by být optimální trajektorie nalezena pomocí mapy NO_x a PM. Tato trajektorie by se lišila vůči trajektorii optimalizované na minimální spotřebu paliva, viz Obr. 5.13. Z Obr. 5.13 lze vyčíst, že s optimální trajektorií pro minimalizaci NO_x dokonce není možné se při max. otáčkách soustrojí (1600 1/min) přiblížit

k max. výkonu SM. Průběhy optimálních trajektorií pro PM a NO_x , zakreslených do charakteristik měrné produkce emisí jsou uvedeny na Obr. 5.14 a Obr. 5.15.

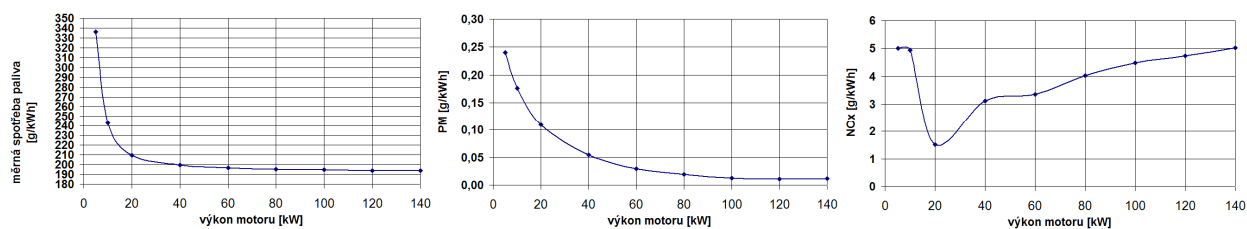


Obr. 5.14 Optimální trajektorie pro minimalizaci produkce PM



Obr. 5.15 Optimální trajektorie pro minimalizaci produkce NO_x

Na Obr. 5.16 jsou zobrazeny průběhy měrné produkce PM a NO_x , které odpovídají optimalizaci na minimální měrnou spotřebu paliva. Průběh měrné produkce PM téměř kopíruje optimální trajektorii spotřeby paliva, ale průběh měrné produkce NO_x je již značně odlišný od optimální trajektorie spotřeby paliva.



Obr. 5.16 Optimální měrná spotřeba paliva a jí odpovídající měrná produkce PM a NO_x v závislosti na výkonu spalovacího motoru

Dosažené hodnoty produkce emisí v gramech na kilowatthodinu za jízdní cyklus SORT 2 uvedené v Tab. 5.2 a zobrazené v Obr. 5.11 a Obr. 5.12 jsou na úrovni emisní normy EURO 3, což odpovídá předpokladu, protože byly použity charakteristiky emisí z motoru B, který plní americkou emisní normu „EPA CARB for heavy duty engines“ [39] z roku 1998, jejíž limity lze přirovnat zhruba k evropské EURO 3.

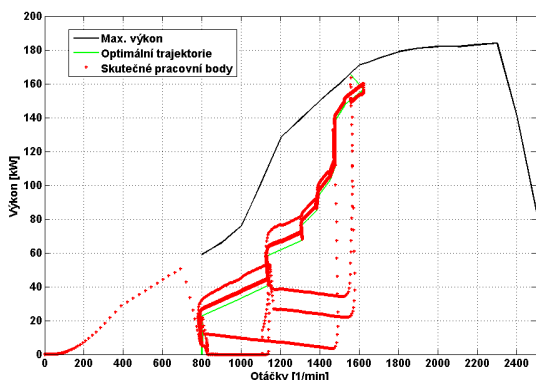
Tab. 5.3 Evropské emisní limity pro vznětové motory nákladních vozidel a autobusů

Evropský emisní limit	Platnost od	Typ testu	NO _x [g/kWh]	PM [g/kWh]
EURO 3	10/2000	ETC	5	0,16
EURO 4	10/2005	ETC	3,5	0,03
EURO 5	10/2008	ETC	2	0,03
EEV	10/1999	ETC	2	0,02
EURO 6	1/2013	ETC	0,4	0,01

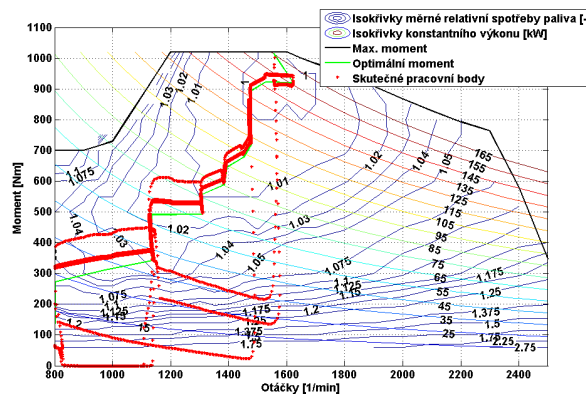
5.2.2 GRAFICKÉ VÝSTUPY ZE SIMULACÍ

V této podkapitole jsou prezentovány výsledky ze simulací v grafické podobě u spojité trajektorie č. 1 a schodovité č. 4.

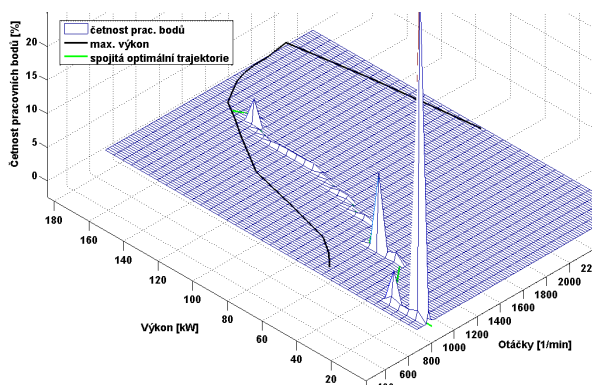
Spojité trajektorie č. 1



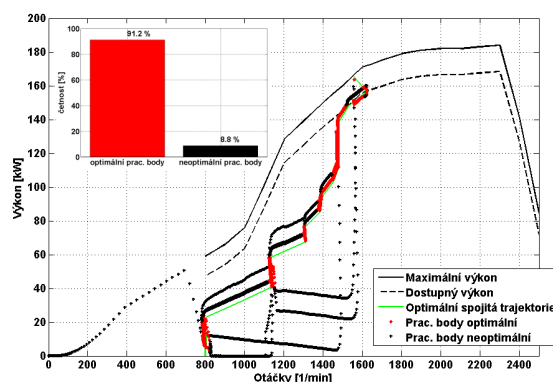
Obr. 5.17 Pracovní body výkonu v jízdním cyklu (spojitá trajektorie č. 1)



Obr. 5.18 Pracovní body momentu v jízdním cyklu (spojitá trajektorie č. 1)



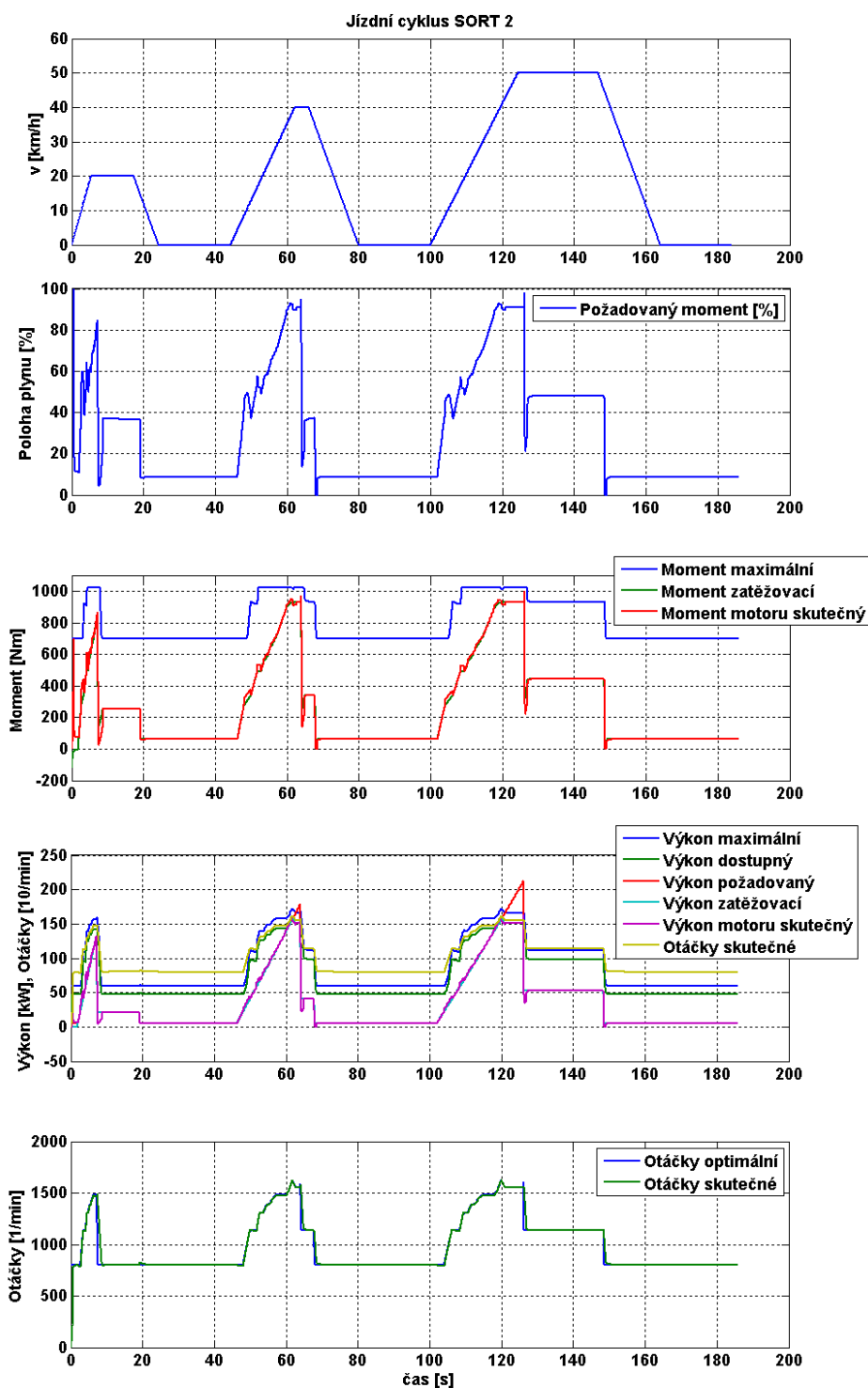
Obr. 5.19 Četnost pracovních bodů výkonu v jízdním cyklu (spojitá trajektorie č. 1)



Obr. 5.20 Optimální pracovní body výkonu v jízdním cyklu včetně jejich četnosti (spojitá trajektorie č. 1)

Neoptimální pracovní body se nacházejí mimo zelenou optimální trajektorii.

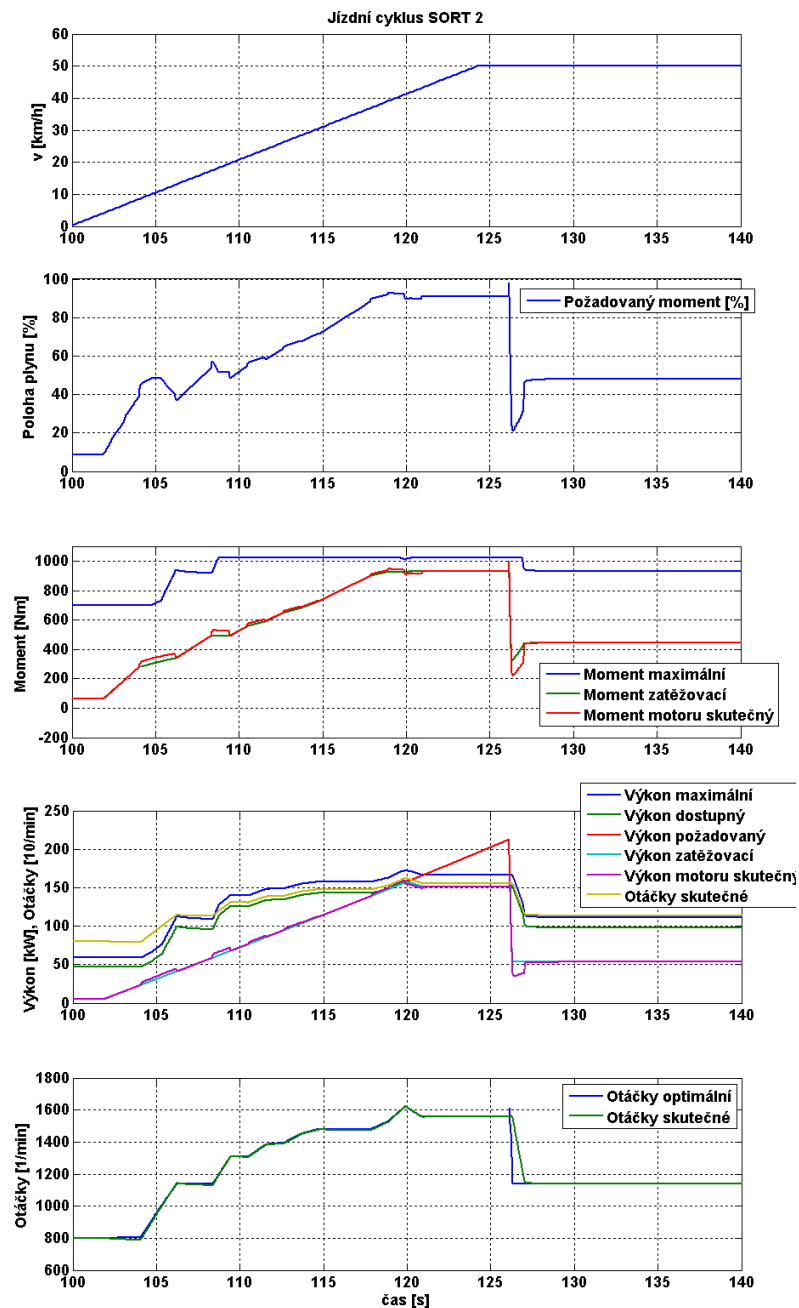
Největší množství pracovních bodů (a tedy i čas strávený v těchto bodech) se nalézá v okolí hodnot výkonů 7,5; 37,5; 52,5 kW což odpovídá četnosti hodnot výkonů v jízdním cyklu SORT 2 s přihlédnutím ke konstantnímu přitížení 5,1 kW od spotřebičů. Poloha těchto špiček v grafu (Obr. 5.19) je správná – leží přímo na optimální trajektorii. Pouze malé množství bodů leží mimo ni (porovnej Obr. 5.17 s Obr. 5.20).



Obr. 5.21 Průběh momentů, výkonů a otáček během jízdního cyklu SORT 2 (spojitá trajektorie č. 1)

Skutečné otáčky motoru takřka přesně kopírují otáčky požadované – optimální, které jsou výstupem z bloku *Diesel Control* a vstupem do regulátoru otáček. Výkon, kterým je zatěžován SM (v grafech nazván jako „Výkon zatěžovací“, světle modrá křivka), kopíruje výkon požadovaný (červená křivka) až do cca 120. sekundy, kdy je požadovaný výkon vyšší než výkon dostupný (zelená křivka), viz detail na Obr. 5.22. Dostupný výkon je výkon maximální při daných otáčkách SM, snížený o max.

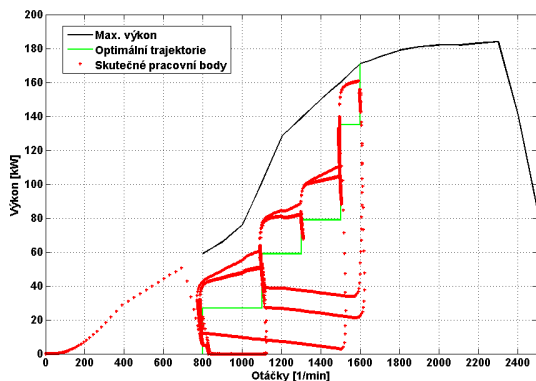
rezervu výkonu a dynamickou rezervu výkonu. Aby SM nebyl přetížen, dojde k jeho odlehčení, zatěžovací výkon klesne na úroveň výkonu dostupného. U reálného vozidla by to vedlo ke snížení schopnosti akcelerace. Bohužel u všech zde použitých jízdních cyklů dochází více či méně k jejich nedodržení díky nedostatečnému výkonu SM a velké hmotnosti vozidla (19,6 tuny).



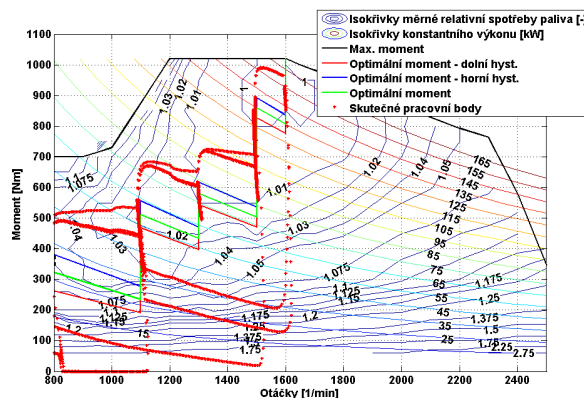
Obr. 5.22 Průběh momentů, výkonů a otáček během jízdního cyklu SORT 2
DETAIL 100. až 140. sekundy
(spojitá trajektorie č. 1)

Výše uvedené průběhy jsou důkazem správného schování modelu při simulacích.

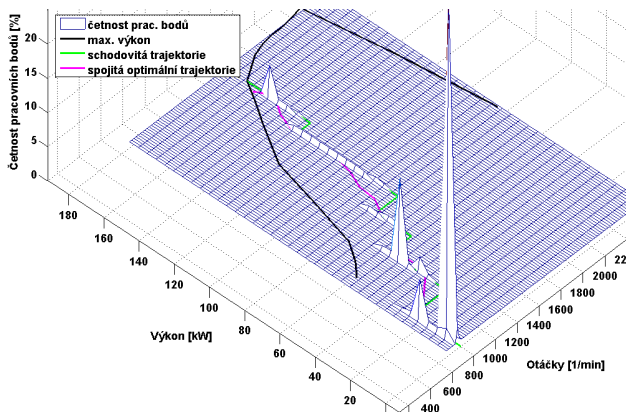
Schodovitá trajektorie č. 4



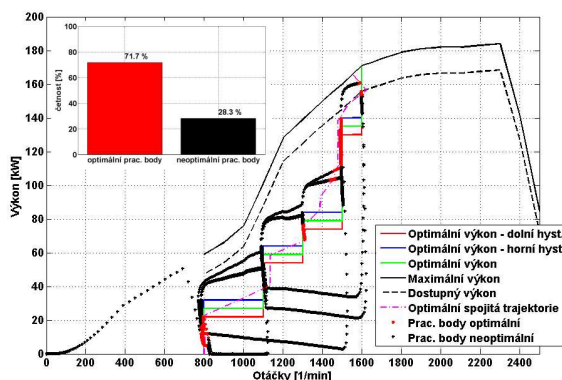
Obr. 5.23 Pracovní body výkonu v jízdním cyklu (schodovitá trajektorie č. 4)



Obr. 5.24 Pracovní body momentu v jízdním cyklu (schodovitá trajektorie č. 4)

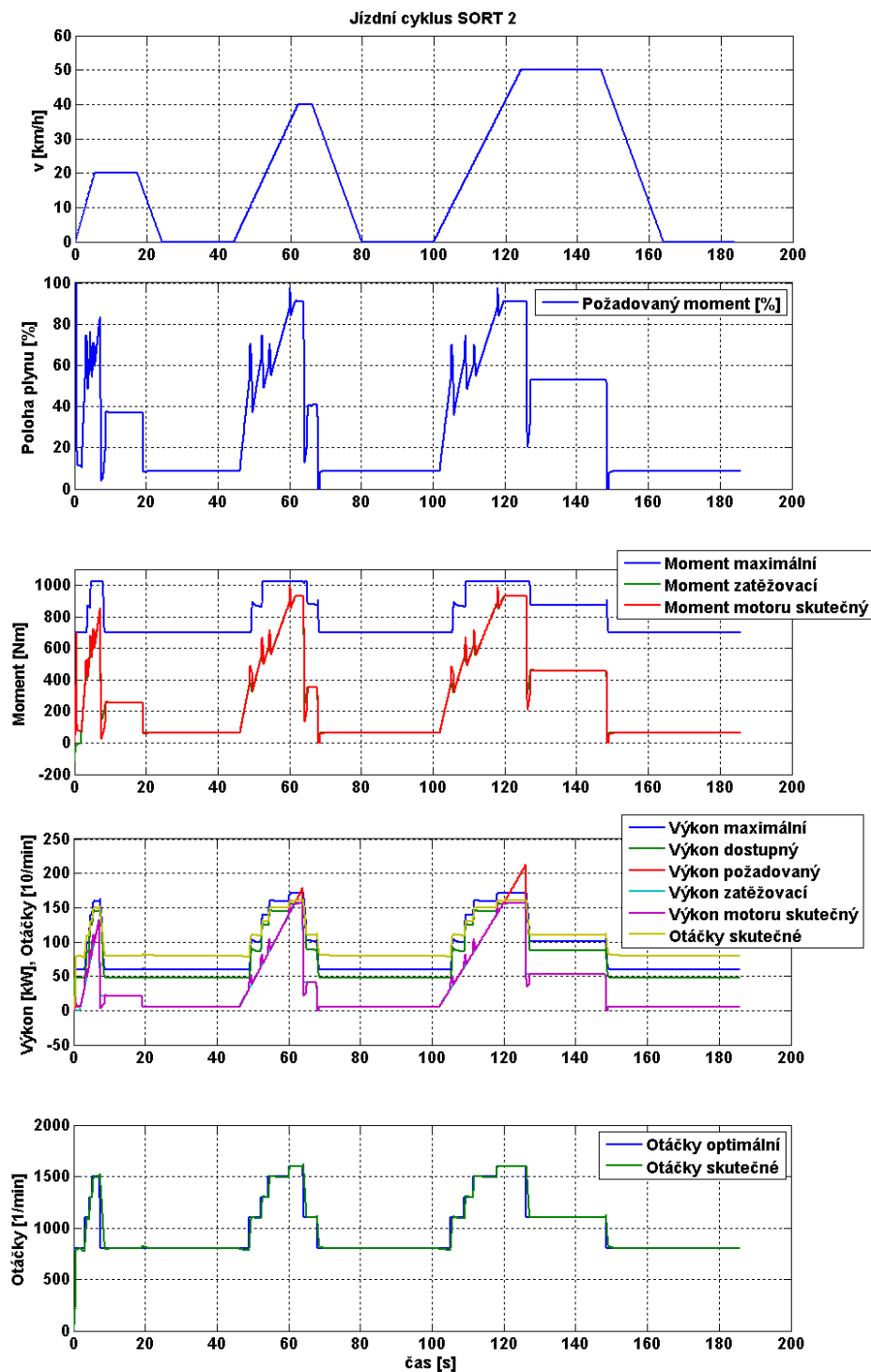


Obr. 5.25 Četnost pracovních bodů výkonu v jízdním cyklu (schodovitá trajektorie č. 4)



Obr. 5.26 Optimální pracovní body výkonu v jízdním cyklu včetně jejich četnosti (schodovitá trajektorie č. 4)

U schodovité trajektorie č. 4 (nejlepší ze schodovitých v cyklu SORT 2) došlo vlivem rozdělení trajektorie do intervalů výkonu s konstantními otáčkami ke snížení počtu optimálních pracovních bodů v okolí optimální spojité trajektorie z 91 % na 71,7 %, tomu odpovídá 54,8 % spotřebovaného paliva v optimální oblasti. Do zbylých 45,2 % spotřeby paliva v neoptimální oblasti patří spotřeba v přechodných dějích (při zrychlování a zpomalování SM) a práce motoru při konstantních otáčkách, ale v pracovních bodech již příliš vzdálených od oblasti optimální trajektorie. Výsledkem je mírné a téměř zanedbatelné zvýšení spotřeby paliva oproti spojité trajektorii, viz Tab. 5.2.

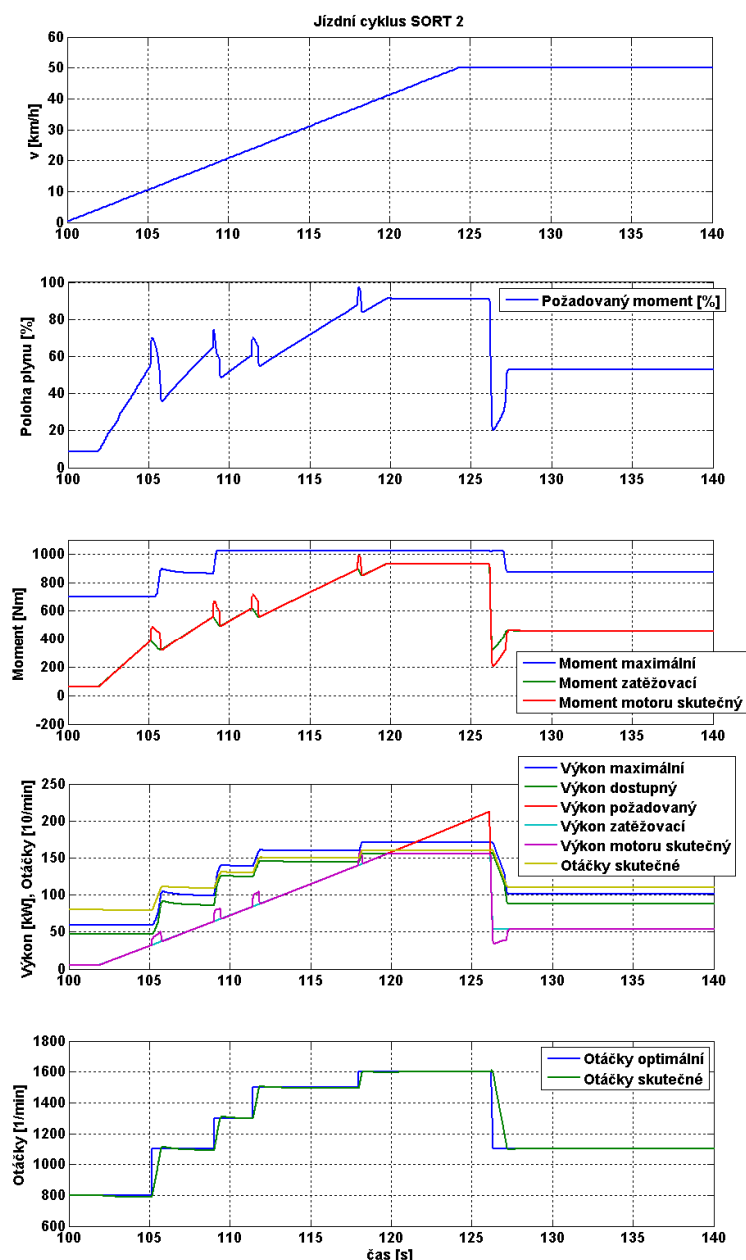


Obr. 5.27 Průběh momentů, výkonů a otáček během jízdního cyklu SORT 2 (schodovitá trajektorie č. 4)

Vidíme, že blok *Diesel Control* nastavuje žádané otáčky (modrá křivka) dle velikosti požadovaného výkonu a schodovité trajektorie (zelená křivka). Skutečné otáčky kopírují žádané, v přechodech lze pozorovat vliv otáčkové rampy (lépe v detailu na Obr. 5.28). Chování ostatních veličin je stejné jako v popisu spojitě trajektorie (text pod Obr. 5.21). Pouze na křivce skutečného výkonu motoru (fialová), skutečného momentu (červená) a žádaného momentu (modrá) jsou patrné

„špičky“, což jsou okamžiky přechodů SM do vyšších otáček, které kryjí dynamický moment/výkon. Jejich velikost nedosahuje maxima výkonu vlivem omezení strmosti otáčkovou rampou (lépe v detailu na Obr. 5.28). Omezení zatěžovacího výkonu dle dostupného výkonu funguje správně. Omezení dostupného výkonu v akceleracích vlivem omezení dávky paliva s ohledem na součinitel přebytku vzduchu lambda se zde nevyskytuje, protože strmost nárůstu požadovaného výkonu není příliš vysoká.

Opět lze prohlásit, že model pracuje bez chyb dle očekávání.



Obr. 5.28 Průběh momentů, výkonů a otáček během jízdního cyklu SORT 2
DETAIL 100. až 140. sekundy
(schodovitá trajektorie č. 4)

Na Obr. 5.28 je detailní pohled na průběhy od 100. do 140. sekundy. Od 120. sekundy lze opět pozorovat omezení zatěžovacího výkonu z důvodu nedostatku výkonu SM. Dobře patrná je funkce otáčkové rampy a navýšení momentu a výkonu SM během přechodů na vyšší otáčky.

5.3 SCÉNÁŘ Č. 2 – TRAJEKTORIE OPTIMALIZOVANÉ PRO RŮZNÉ JÍZDNÍ CYKLY

Předmětem scénáře č. 2 bylo zjištění rozdílů ve spotřebě paliva a produkci emisí při použití schodovité trajektorie optimalizované pro zvolený jízdní cyklus a trajektorie pro tento jízdní cyklus neoptimalizované.

Simulace probíhaly tak, že pro každý cyklus byla nalezena optimální schodovitá trajektorie a s touto trajektorií byla provedena simulace jízdy vozidla ve všech jízdních cyklech. Tento postup byl opakován pro každý jízdní cyklus a trajektorii. Výsledky byly následně porovnány.

Z výsledků simulací lze stanovit citlivost optimalizace schodovité trajektorie na zvolený jízdní cyklus.

Opět byly použity standardizované jízdní cykly SORT1, SORT2, SORT3 pro autobusy + jízdní cyklus NYCC pro osobní vozidla. Důvodem použití i jízdního cyklu NYCC jsou jeho odlišné parametry vůči jinak sobě velmi podobným cyklům SORT.

Nastavení simulace u všech zkoumaných trajektorií a jízdních cyklů (nastavení je stejné jako u scénáře č. 1):

- Odběr spotřebičů konstantních 5,1 kW.
- Dynamická korekce emisí v modelu SM zapnuta
- Konstanty PI regulátoru otáček SM: $K_p = 1$, $K_i = 1$
- Omezení strmosti žádané hodnoty otáček do regulátoru otáček na ± 500 1/min/s
- Rezerva maximálního výkonu = 3 % z aktuální hodnoty max. výkonu při daných otáčkách
- Rezerva na dynamický výkon = 10 kW (konstantní, nezávislá na pracovním bodě)
- Hystereze výkonu = 10 kW (konstantní, nezávislá na pracovním bodě) – pouze u schodovitých trajektorií

5.3.1 POUŽITÉ TRAJEKTORIE

Za účelem této analýzy vznikly nové schodovité trajektorie (označené č. 5, 6, 7) optimalizované na konkrétní jízdní cyklus. Všechny vycházejí ze schodovité trajektorie č. 4, tj. mají stejný počet výkonových intervalů, ale jsou různé jejich šířky a otáčky.

Seznam nových trajektorií použitých při simulacích ve scénáři č.2:

- Trajektorie č. 5 – optimalizace pro jízdní cyklus SORT 1.
- Trajektorie č. 6 – optimalizace pro jízdní cyklus SORT 3.
- Trajektorie č. 7 – optimalizace pro jízdní cyklus NYCC.

Tab. 5.4 Scénář č. 2 - Seznam všech použitých trajektorií ve scénáři č. 2

č.	Typ trajektorie	Popis tvaru trajektorie	Grafická podoba
1	spojitá	spojitá změna otáček s výkonem	
2	schodovitá výchozí	<p><u>4 výkonové intervaly:</u></p> <p>0 – 22,85 kW při 800 1/min 22,85 – 68,41 kW při 1136 1/min 68,41 – 120 kW při 1308 1/min 120 – 171 kW při 1600 1/min</p>	
3	schodovitá upravená dynamicky pro SORT 2	<p><u>4 výkonové intervaly:</u></p> <p>0 – 27 kW při 800 1/min 27 – 59 kW při 1100 1/min 59 – 135kW při 1500 1/min 135 – 171 kW při 1600 1/min</p>	
4	schodovitá upravená dynamicky pro SORT 2	<p><u>5 výkonových intervalů:</u></p> <p>0 – 27 kW při 800 1/min 27 – 59 kW při 1100 1/min 59 – 79 kW při 1300 1/min 79 – 135 kW při 1500 1/min 135 – 171 kW při 1600 1/min</p>	

5	schodovitá upravená dynamicky pro SORT 1	<p><u>5 výkonových intervalů:</u> 0 – 37 kW při 800 1/min 37 – 57 kW při 1150 1/min 57 – 79 kW při 1300 1/min 79 – 131 kW při 1450 1/min 131 – 171 kW při 1600 1/min</p>	
6	schodovitá upravená dynamicky pro SORT 3	<p><u>5 výkonových intervalů:</u> 0 – 37 kW při 800 1/min 37 – 59 kW při 1150 1/min 59 – 77 kW při 1350 1/min 77 – 135 kW při 1500 1/min 135 – 171 kW při 1600 1/min</p>	
7	schodovitá upravená dynamicky pro NYCC	<p><u>5 výkonových intervalů:</u> 0 – 41 kW při 800 1/min 41 – 63 kW při 1025 1/min 63 – 95 kW při 1275 1/min 95 – 139 kW při 1500 1/min 139 - 171 kW při 1600 1/min</p>	

5.3.2 VÝSLEDKY SIMULACÍ

Před vlastní analýzou výsledků je nutné podotknout, že výsledky mohou být mírně zkreslené vlivem nedostatečného výkonu SM (171 kW při 1600 1/min). Především v jízdních cyklech SORT 3 a NYCC se vyskytují déle trvající požadavky na výkon větší než je schopen SM poskytnout. V těchto případech je SM zatěžován výkonem nižším, aby nedošlo k jeho přetížení. Jízda v jízdním cyklu tudíž není simulována zcela přesně.

Spotřeba paliva

Pro porovnání byla do tabulek zanesena i spojitá trajektorie č. 1, která není optimalizovaná pro žádný konkrétní jízdní cyklus, nýbrž je optimalizovaná staticky na základě úplné charakteristiky SM.

Tab. 5.5 Scénář č. 2 - Celková spotřeba paliva [g] - vliv optimalizace na konkrétní jízdní cyklus

	SORT 1	SORT 2	SORT 3	NYCC
Spojitá trajektorie č. 1 spotřeba paliva [g]	248,25	375,16	544,06	940,17
Schodovitá trajektorie č. 4 spotřeba paliva [g]	249,63	377,18	548,71	944,46
Schodovitá trajektorie č. 5 spotřeba paliva [g]	249,61	378,65	549,86	942,00
Schodovitá trajektorie č. 6 spotřeba paliva [g]	249,65	377,57	548,71	942,19
Schodovitá trajektorie č. 7 spotřeba paliva [g]	250,13	378,52	549,89	935,46

Tab. 5.6 Scénář č. 2 - Spotřeba paliva [l/100km] - vliv optimalizace na konkrétní jízdní cyklus

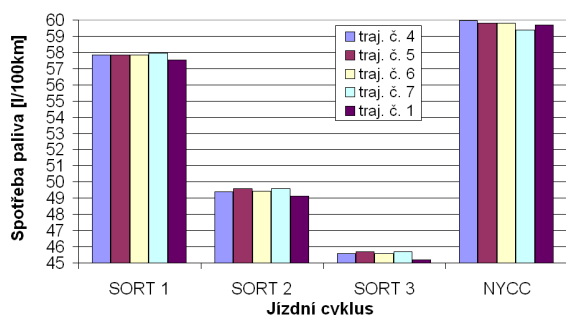
	SORT 1	SORT 2	SORT 3	NYCC
Spojitá trajektorie č. 1 spotřeba paliva [l/100km]	57,519	49,130	45,206	59,681
Schodovitá trajektorie č. 4 spotřeba paliva [l/100km]	57,839	49,395	45,593	59,953
Schodovitá trajektorie č. 5 spotřeba paliva [l/100km]	57,833	49,588	45,689	59,797
Schodovitá trajektorie č. 6 spotřeba paliva [l/100km]	57,843	49,446	45,593	59,809
Schodovitá trajektorie č. 7 spotřeba paliva [l/100km]	57,954	49,570	45,691	59,382

Tab. 5.7 Scénář č. 2 - Procentuální rozdíly mezi trajektoriemi - vliv optimalizace na konkrétní jízdní cyklus

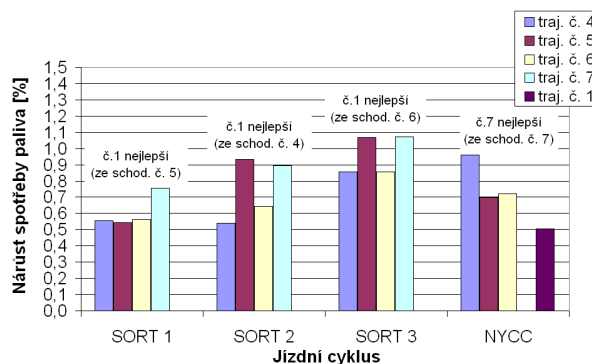
	SORT 1	SORT 2	SORT 3	NYCC
Spojité trajektorie č. 1 spotřeba paliva [%]	0,000	0,000	0,000	0,503
Schodovitá trajektorie č. 4 nárůst spotřeby paliva [%]	0,556	0,540	0,856	0,961
Schodovitá trajektorie č. 5 nárůst spotřeby paliva [%]	0,545	0,932	1,067	0,699
Schodovitá trajektorie č. 6 nárůst spotřeby paliva [%]	0,564	0,644	0,854	0,719
Schodovitá trajektorie č. 7 nárůst spotřeby paliva [%]	0,756	0,896	1,072	0,000

Pozn.: Údaj je vztažen vždy vůči nejlepší trajektorii v daném jízdním cyklu

V tabulkách je **šedým stínováním** vždy označena trajektorie, která byla optimalizována pro ten konkrétní jízdní cyklus. **Červeným písmem** je pak vždy označena nejnižší spotřeba paliva [l/100km] v daném jízdním cyklu. **Tučně** je v daném jízdním cyklu označena vždy nejlepší schodovitá trajektorie.



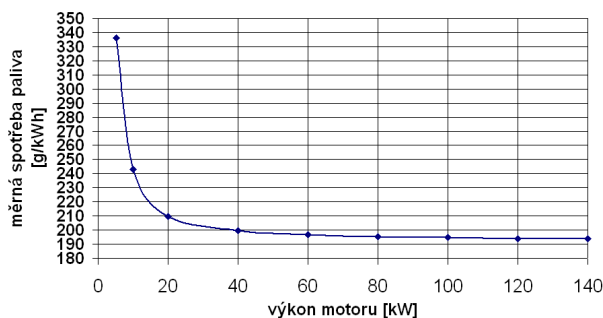
Obr. 5.29 Vliv optimalizace trajektorie na konkrétní jízdní cyklus



Obr. 5.30 Procentuální rozdíly ve spotřebě paliva mezi trajektoriemi

Pokud se nejprve budeme zabývat trajektoriemi schodovitými, je nejnižší spotřeba paliva v daném jízdním cyklu dosaženo vždy s trajektorií optimalizovanou přímo pro tento jízdní cyklus. Na Obr. 5.30 je název nejlepší schodovité trajektorie v daném jízdním cyklu uveden vždy v závorce nad sloupci. Pokud je zvolen některý z jízdních cyklů SORT, nejsou rozdíly mezi trajektoriemi optimalizovanými dle různých jízdních cyklů SORT příliš velké. Trajektorie optimalizované pro jízdní cykly SORT jsou č. 4, 5 a 6. Jak je vidět z grafu na Obr. 5.30, maximální dosažený rozdíl mezi nimi činí cca 0,4 %, a to v cyklu SORT 2 mezi trajektorií č. 4 a 5. Trochu větší rozdíl nastane pokud se použije trajektorie optimalizovaná pro některý z cyklů SORT v cyklu NYCC. V tomto případě dojde ke zvýšení spotřeby paliva o necelé 1 % (modrý sloupec - traj. č. 4 na Obr. 5.30 úplně vpravo). Možným důvodem je velká podobnost jízdních cyklů SORT, ale poměrně velký rozdíl mezi cykly SORT a NYCC (viz kapitola 4.2.3).

Pokud nyní do výsledků zahrneme i spojitou trajektorii č. 1, dojdeme k závěru, že v případě jízdních cyklů SORT 1 až 3 je vždy absolutně nejlepší. Jiná situace je v cyklu NYCC, kdy bylo nejmenší spotřeby paliva dosaženo se schodovitou trajektorií č. 7, nikoliv se spojitou č. 1, jak by se dalo očekávat. Schodovitá trajektorie č. 7 byla přímo optimalizovaná pro jízdní cyklus NYCC. Úspora paliva vůči spojitě trajektorii činí cca 0,5 %.



Obr. 5.31 Měrná spotřeba paliva [g/kWh]
v závislosti na výkonu SM
(platí pro optimální spojitou trajektorii č. 1)

využito v jízdním cyklu SORT 3, průměrná měrná spotřeba paliva [g/kWh] zde byla nejnižší.

Obecně je vždy vhodné provozovat SM na výkonu, kterému odpovídá malá relativní spotřeba paliva a tedy vysoká účinnost (Obr. 5.31). Pokud bude SM zatížen výkonem cca pod 40 kW, začne rychle vzrůstat měrná spotřeba paliva a klesat účinnost motoru.

Výše uvedené výsledky spotřeb paliva v jízdních cyklech velmi korespondují s udávanou spotřebou paliva [l/100km] v příručce [41] k jízdním cyklům SORT při uvažování autobusu nikoliv o hmotnosti 14,3 tuny (referenční hmotnost v příručce), nýbrž 19,6 tuny (hmotnost simulovaného vozidla).

Závěrem lze prohlásit, že výsledek optimalizace schodovité trajektorie se zahrnutím dynamického provozu SM je ovlivněn výběrem jízdního cyklu, respektive znalostí průběhu požadovaného výkonu v čase. Vliv jízdního cyklu ovšem není velký. Úspora paliva, kterou lze dosáhnout optimalizací na konkrétní jízdní cyklus (respektive průběh požadovaného výkonu), činí dle uskutečněných simulací pouze řádově desítiny procent až procento.

Dále nelze prohlásit, že spojitá trajektorie č. 1 je ve všech případech optimální. V provedených simulacích je optimální ve spotřebě paliva pouze v jízdních cyklech SORT.

Celková spotřeba paliva v gramech i spotřeba v litrech na 100 km je závislá na typu jízdního cyklu. Nejvyšší je u jízdního cyklu NYCC, který klade velké požadavky na výkon SM (velká zrychlení, vysoká rychlost). Z cyklů SORT vychází nejvyšší spotřeba paliva na kilometr u SORT 1, což je způsobeno velkým procentuálním podílem stání v jízdním cyklu a krátkou ujetou vzdáleností. Stání v jízdním cyklu má negativní dopad na účinnost spalovacího procesu, protože motor pracuje s nízkým výkonem v oblastech s vysokou měrnou spotřebou paliva. Nejlépe bylo palivo

Emise

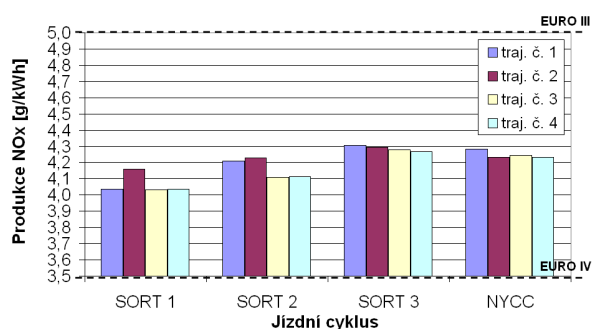
V tabulkách je šedým stínováním vždy označena trajektorie, která byla optimalizována pro ten konkrétní jízdní cyklus. Červeným písmem je pak vždy označena nejnižší produkce emisí v daném jízdním cyklu. Tučně je v daném jízdním cyklu označena vždy nejlepší schodovitá trajektorie.

Tab. 5.8 Scénář č. 2 - Vliv jízdních cyklů na produkci emisí NO_x

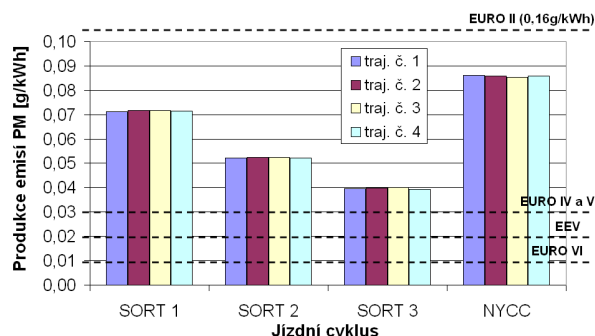
	SORT 1	SORT 2	SORT 3	NYCC
Spojité trajektorie č. 1 NO _x [g/kWh]	4,037	4,209	4,304	4,281
Schodovitá trajektorie č. 2 NO _x [g/kWh]	4,160	4,227	4,294	4,232
Schodovitá trajektorie č. 3 NO _x [g/kWh]	4,032	4,110	4,279	4,243
Schodovitá trajektorie č. 4 NO _x [g/kWh]	4,035	4,112	4,266	4,232

Tab. 5.9 Scénář č. 2 - Vliv jízdních cyklů na produkci emisí PM

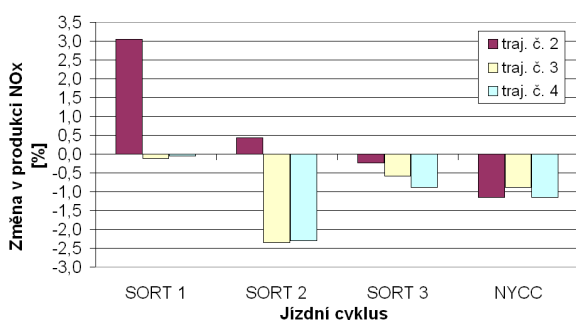
	SORT 1	SORT 2	SORT 3	NYCC
Spojité trajektorie č. 1 PM [g/kWh]	0,0711	0,0523	0,0395	0,0860
Schodovitá trajektorie č. 2 PM [g/kWh]	0,0717	0,0524	0,0398	0,0858
Schodovitá trajektorie č. 3 PM [g/kWh]	0,0716	0,0525	0,0400	0,0853
Schodovitá trajektorie č. 4 PM [g/kWh]	0,0714	0,0523	0,0394	0,0859



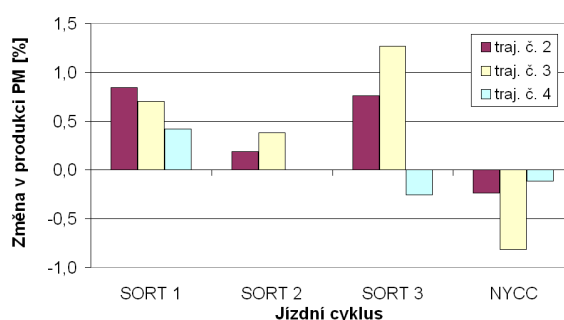
Obr. 5.32 Produkce emisí NO_x v závislosti na jízdním cyklu



Obr. 5.33 Produkce emisí PM v závislosti na jízdním cyklu



Obr. 5.34 Procentuální změna v produkci emisí NO_x v závislosti na jízdním cyklu



Obr. 5.35 Procentuální změna v produkci emisí PM v závislosti na jízdním cyklu

Vliv použité trajektorie na produkci emisí NO_x i PM v různém jízdním cyklu není jednoznačný. Pořadí trajektorií se s ohledem na produkci emisí v jednotlivých jízdních cyklech mění (Obr. 5.32 a Obr. 5.33). Nelze předpokládat, že např. trajektorie č. 3 bude s ohledem na produkci NO_x v jízdním cyklu SORT 3 nejlepší, pokud byla nejlepší v jízdním cyklu SORT 2. Dále není možné automaticky předpokládat, že trajektorie optimalizovaná na spotřebu paliva pro určitý jízdní cyklus, bude optimální i v produkci emisí NO_x a PM nebo naopak. To vyplývá z rozdílných požadavků při optimalizaci.

Na Obr. 5.34 a Obr. 5.35 jsou uvedeny procentuální změny produkce emisí v každém jízdním cyklu, přičemž referenční trajektorií je spojitá č. 1. Kladná procentuální změna v Obr. 5.34 a Obr. 5.35 znamená zvýšení produkce emisí vůči spojitě optimální trajektorii č. 1, záporná změna jejich snížení. Na těchto obrázcích jsou ještě více patrné rozdíly mezi trajektoriemi v závislosti na použitém jízdním cyklu. Tyto rozdíly se napříč jízdními cykly pohybují cca do 3 % u NO_x a do 1,3 % u PM.

Závěrem lze prohlásit, že nelze jednoznačně určit vliv použité trajektorie na produkci emisí, vzhledem k tomu, že optimalizace byla provedena s kritériem minimální spotřeby paliva, nikoliv emisí.

Vliv použitého jízdního cyklu na produkci emisí je naopak velmi zřetelný.

5.4 SCÉNÁŘ Č. 3 – VLIV VELIKOSTI HYSTEREZE VÝKONU U SCHODOVITÉ TRAJEKTORIE

Tento scénář má za úkol objasnit vliv velikosti hystereze výkonu u schodovitých trajektorií na spotřebu paliva. Vliv na emise není zkoumán, vzhledem k tomu, že výsledky by byly nejednoznačné, protože všechny trajektorie byly optimalizovány na minimální spotřebu paliva, nikoliv na minimální produkci emisí.

Hystereze výkonu u schodovitých trajektorií byla do algoritmu zavedena uměle, aby nedocházelo k častým změnám otáček, pokud by žádaná hodnota výkonu cyklovala okolo výkonové hranice pro přechod na jiné otáčky.

Velikost hystereze byla v simulacích měněna od 0 do 20 kW, přičemž hystereze byla ve všech výkonových intervalech stejná.

Vliv hystereze byl vyšetřován pro jízdní cykly SORT a pro schodovité trajektorie č. 4 až 8. Je vhodné připomenout, že trajektorie č. 4 až 7 byly optimalizovány pro různý jízdní cyklus, ale se stejně nastavenou hysterezí na hodnotu 10 kW. Jízdní cyklus NYCC nebyl použit z důvodu obtížné reprezentovatelnosti výsledků, neboť valnou část jízdního cyklu je SM zatěžován pouze omezeným výkonem, aby nedošlo k jeho přetížení, a tudíž není jízdní cyklus dodržen. Nelze pak rozpoznat, zda je změna spotřeby paliva způsobená změnou hystereze nebo změnou hodnoty výkonu, kterým je SM v jízdním cyklu zatěžován.

Byla vytvořena nová schodovitá trajektorie č. 8 za účelem zjištění vlivu velikosti hystereze, se kterou je trajektorie optimalizována. Vychází z trajektorie č. 4 (nejlepší schodovitá pro cyklus SORT 2), ale s tím rozdílem, že do optimalizace vstupovala s hysterezí nastavenou na 5 kW, tedy na poloviční hodnotu.

Seznam všech trajektorií použitých v simulačním scénáři č. 3:

- Trajektorie č. 4 - optimalizace pro jízdní cyklus SORT 2.
- Trajektorie č. 5 – optimalizace pro jízdní cyklus SORT 1.
- Trajektorie č. 6 – optimalizace pro jízdní cyklus SORT 3.
- Trajektorie č. 7 – optimalizace pro jízdní cyklus NYCC.
- Trajektorie č. 8 – optimalizace pro jízdní cyklus SORT 2, poloviční hystereze 5 kW.

Nastavení simulace u všech zkoumaných trajektorií a jízdních cyklů:

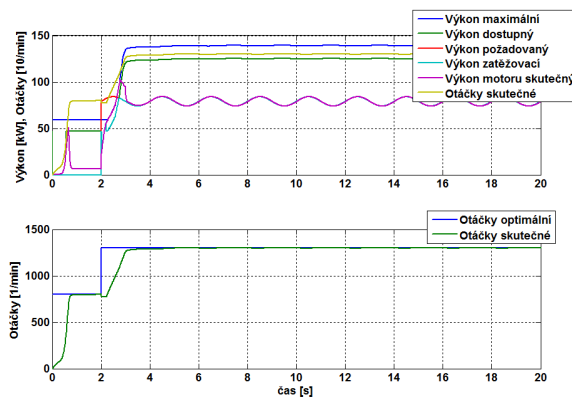
- Odběr spotřebičů konstantních 5,1 kW
- Dynamická korekce emisí v modelu SM zapnuta
- Konstanty PI regulátoru otáček SM: $K_p = 1$, $K_i = 1$
- Omezení strmosti žádané hodnoty otáček do regulátoru otáček na ± 500 1/min/s
- Rezerva maximálního výkonu = 3 % z aktuální hodnoty max. výkonu při daných otáčkách
- Rezerva na dynamický výkon = 10 kW (konstantní, nezávislá na pracovním bodě)

5.4.1 VÝSLEDKY SIMULACÍ

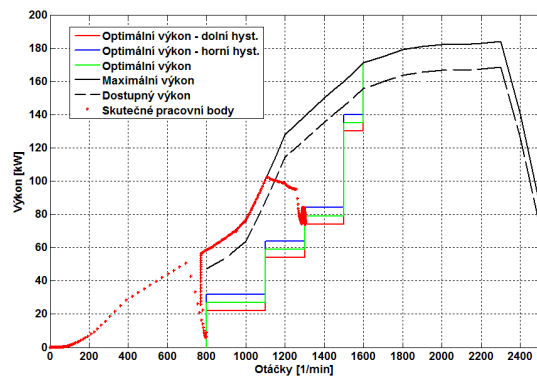
Nejprve je vhodné demonstrovat účel hystereze. Pro tento případ byl vytvořen umělý průběh žádané hodnoty výkonu ve formě sinusovky o frekvenci 0,5 Hz, amplitudě 5 kW a střední hodnotě 79 kW. Délka trvání testu byla 100 period. Pro test byla vybrána schodovitá trajektorie č. 4, nejprve s hysterezí nastavenou na 10 kW, poté s hysterezí 9 kW. Tyto konkrétní hodnoty byly zvoleny tak, aby v prvním případě nedocházelo ke změnám otáček při změně výkonu (výkon se mění pouze v rámci hysterezního pásma). Ve druhém případě je nastavená hystereze menší než rozkmit žádané hodnoty výkonu a tudíž SM bude pravidelně měnit své otáčky.

Tab. 5.10 Scénář č. 3 - Demonstrace účelnosti zavedení hystereze

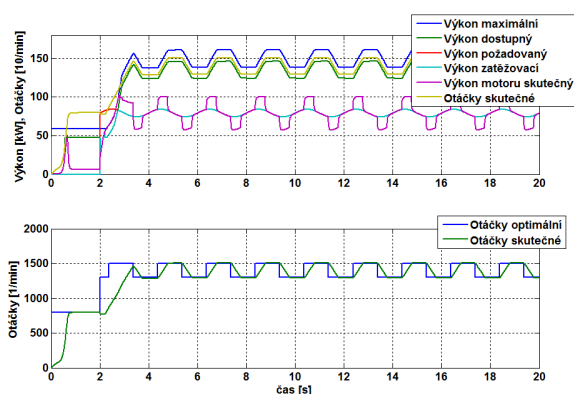
Trajektorie a hystereze	Spotřeba paliva [g]	Produkce NO _x [g/kWh]	Produkce PM [g/kWh]	Četnost bodů v optimální oblasti [%]	Spotřeba paliva v optimální oblasti [%]	Počet přechodů na jiné otáčky [-]
Schodovitá č. 4 hystereze = 10 kW	851,24	3,957	0,0248	42,26	40,12	1
Schodovitá č. 4 hystereze = 9 kW	855,07	4,080	0,0293	9,98	10,11	199



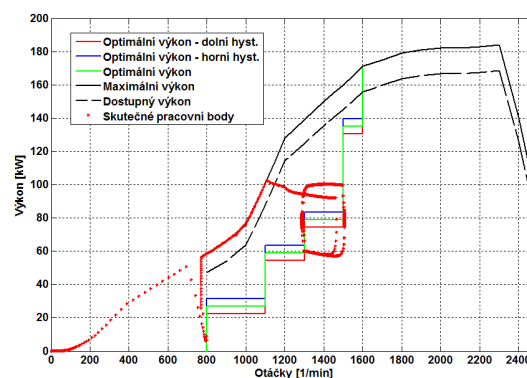
Obr. 5.36 Průběh výkonu a otáček SM (hystereze 10 kW)



Obr. 5.37 Pracovní body SM (hystereze 10 kW)



Obr. 5.38 Průběh výkonu a otáček SM
(hystereze 9 kW)



Obr. 5.39 Pracovní body SM
(hystereze 9 kW)

Tab. 5.11 Scénář č. 3 - Demonstrace účelnosti zavedení hystereze - změny sledovaných parametrů

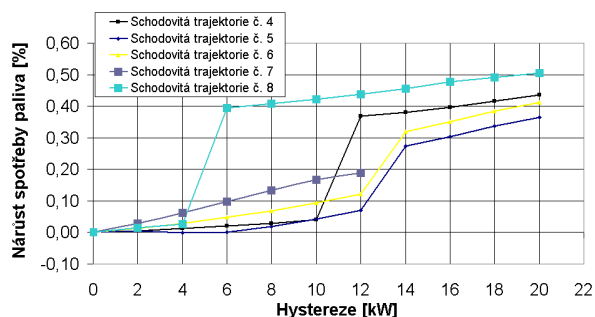
Trajektorie a hystereze	Nárůst spotřeby paliva [%]	Nárůst produkce NO _x [%]	Nárůst produkce PM [%]	Počet přechodů na jiné otáčky [-]
Schodovitá č. 4 hystereze = 10 kW	0,00	0,00	0,00	1
Schodovitá č. 4 hystereze = 9 kW	0,45	3,11	18,15	199

Pokud se žádaná hodnota výkonu pohybuje na hranici přechodu do dalšího výkonového intervalu a je nastavena malá hystereze, dochází k opakovaným změnám otáček SM. To se projeví mírným zvýšením spotřeby paliva (0,45 % v tomto konkrétním případě), ale především zvýšením produkce pevných částic PM. V tomto konkrétním případě o cca 18 %. Nárůst NO_x je menší, jen cca 3 %. Viz Tab. 5.11, ve které je nárůst parametrů vztažen k případu, kdy je nastavena větší hystereze a nedochází ke změnám otáček s výkonem.

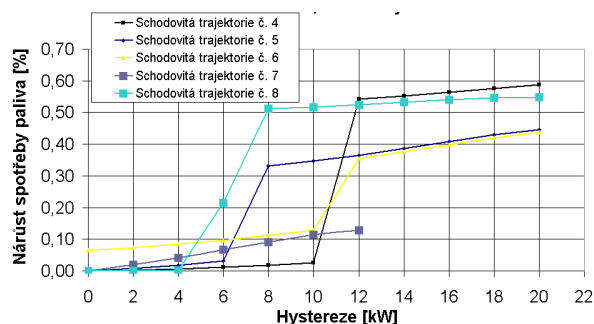
Nyní následují výsledky simulací zaměřených na zjištění vlivu velikosti hystereze na spotřebu paliva dle zvolené schodovité trajektorie a jízdního cyklu.

Tab. 5.12 Scénář č. 3 - Vliv velikosti hysterese u schodovité trajektorie č. 4 a jízdního cyklu SORT 2

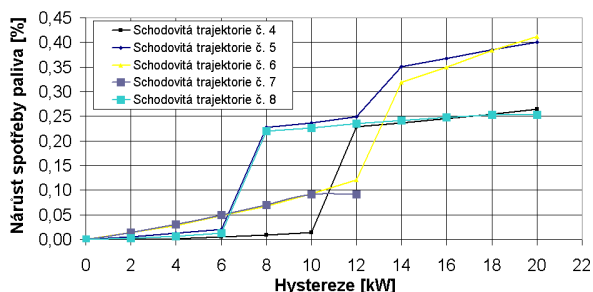
Hystereze [kW]	Spotřeba paliva za jízdní cyklus [g]	Spotřeba paliva [l/100km]	Nárůst spotřeby [%]	Četnost pracovních bodů SM v optimální oblasti [%]	Spotřeba paliva v optimální oblasti [%]	Počet přechodů na jiné otáčky [-]
0	377,09	49,383	0,00	71,37	53,15	22
2	377,10	49,384	0,00	71,44	53,45	22
4	377,11	49,386	0,01	71,51	53,80	22
6	377,13	49,388	0,01	71,65	54,31	22
8	377,15	49,392	0,02	71,70	54,62	22
10	377,18	49,395	0,03	71,69	54,79	22
12	379,13	49,650	0,54	65,87	51,27	22
14	379,17	49,655	0,55	65,70	51,28	22
16	379,21	49,661	0,56	65,56	51,26	22
18	379,26	49,667	0,58	65,56	51,49	22
20	379,30	49,673	0,59	65,55	51,57	22



Obr. 5.40 Vliv hysterese na spotřebu paliva (jízdní cyklus SORT 1, různé trajektorie)



Obr. 5.41 Vliv hysterese na spotřebu paliva (jízdní cyklus SORT 2, různé trajektorie)



Obr. 5.42 Vliv hysterese na spotřebu paliva (jízdní cyklus SORT 3, různé trajektorie)

Univerzita Pardubice Dopravní fakulta Jana Pernera	Dizertační práce	117
---	------------------	-----

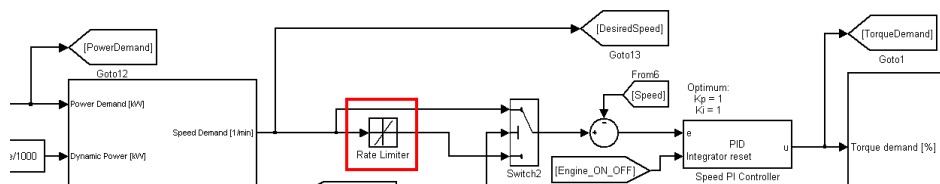
U jízdních cyklů SORT je pozorovatelný nárůst spotřeby paliva při zvětšování pásma hystereze. Výrazný nárůst spotřeby (zlom na křivce) nastává v okolí hodnoty hystereze, se kterou byla trajektorie optimalizována (10 kW u č. 4 až 7, 5 kW u č. 8) . Při dalším zvětšování hystereze již není nárůst spotřeby paliva příliš velký. Pokud je hystereze volena menší, než se kterou byla trajektorie optimalizována, je její vliv na spotřebu paliva zanedbatelný. Zde je nutné poznamenat, že se ve všech simulovaných případech neměnil s hysterezí počet přechodů na jiné otáčky. Pokud nedochází při zvětšování hysterezního pásma ke snížení počtu přechodů, je zbytečné, a jak vyplývá z výsledků i nežádoucí, další rozšiřování hysterezního pásma. Bohužel nebyl k dispozici jízdní cyklus, který by měl takový průběh, u kterého by bylo možné odměřit závislost mezi šířkou hystereze a počtem přechodů na jiné otáčky a dopad na spotřebu paliva. Lze ovšem předpokládat dle výsledků v úvodu této stati (Tab. 5.10), že snížení počtu přechodů na jiné otáčky bude pozitivní a dojde k úsporám paliva.

Po dosažení optimální šířky hysterezního pásma, je její další zvětšování nevýhodné, protože dochází ke zvýšení spotřeby paliva, to řádově o desetiny procent. Z tohoto hlediska je vhodné velikost hystereze volit co nejmenší, ale s ohledem na minimalizaci počtu přechodů SM na jiné otáčky.

5.5 SCÉNÁŘ Č. 4 – VLIV OMEZENÍ STRMOSTI ŽÁDANÉ HODNOTY OTÁČEK

Tento simulační scénář se zabývá zjištěním vlivu omezení strmosti žádané hodnoty otáček vstupující do regulátoru otáček na spotřebu paliva a emise SM.

Omezení strmosti žádané hodnoty otáček (tzv. „otáčková rampa“) do regulátoru otáček je v simulačním modelu realizováno blokem *Rate Limiter* - Obr. 5.43.



Obr. 5.43 Omezení strmosti žádané hodnoty otáček
(blok *Rate Limiter*)

Důvodem omezení strmosti žádané hodnoty otáček je potlačení prudkých změn žádané hodnoty momentu, který je výstupem z regulátoru otáček a zároveň vstupem do modelu SM (vstup „Torque Demand“). Rychlé změny by se mohly projevit negativně - zvýšenou produkcí emisí.

V simulacích byly vyzkoušeny následující hodnoty strmosti otáčkové rampy: ± 250 1/min/s, ± 500 1/min/s, ± 1000 1/min/s a otáčková rampa vypnuta, tj. bez omezení. Jak je z hodnot patrné, strmost byla omezována jak při růstu, tak i poklesu otáček. Dále byla vyzkoušena varianta, kdy otáčková rampa omezovala pouze strmost nárůstu otáček, jejich pokles neovlivňovala. U této druhé varianty (v následujících grafech označena jako varianta +) byl předpoklad další úspory paliva a nižší produkce emisí, neboť při přechodu na otáčky nižší není třeba motoru dodávat palivo, k jeho zpomalení dojde samovolně - působením připojené zátěže.

Simulace probíhaly v jízdních cyklech SORT 1 až 3 a vliv otáčkové rampy byl vyšetřován jak pro spojitou trajektorii č. 1, tak pro jednu ze schodovitých (konkrétně č. 4). Jízdní cyklus NYCC nebyl použit z důvodu obtížné reprezentovatelnosti výsledků, neboť valnou část jízdního cyklu je SM zatěžován pouze omezeným výkonem, aby nedošlo k jeho přetížení. Výkon, kterým může být SM zatěžován je závislý na otáčkách a tudíž i na jejich rychlosti poklesu nebo nárůstu. Pro různou strmost otáčkové rampy pak dostáváme jiné podmínky provozu SM, protože se mění průměrná hodnota výkonu, kterým je SM zatěžován a výsledky díky tomu nelze přesně vyhodnotit.

Nastavení simulace u všech zkoumaných hodnot omezení strmosti:

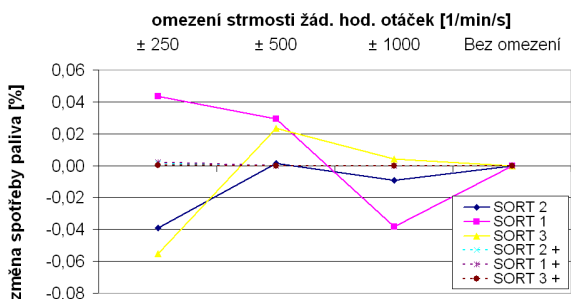
- Odběr spotřebičů konstantních 5,1 kW
- Dynamická korekce emisí v modelu SM zapnuta
- Konstanty PI regulátoru otáček SM: $K_p = 1$, $K_i = 1$
- Rezerva maximálního výkonu = 3 % z aktuální hodnoty max. výkonu při daných otáčkách
- Rezerva na dynamický výkon = 10 kW (konstantní, nezávislá na pracovním bodě)
- Hystereze výkonu = 10 kW (konstantní, nezávislá na pracovním bodě) – pouze u schodovitých trajektorií

5.5.1 VÝSLEDKY SIMULACÍ

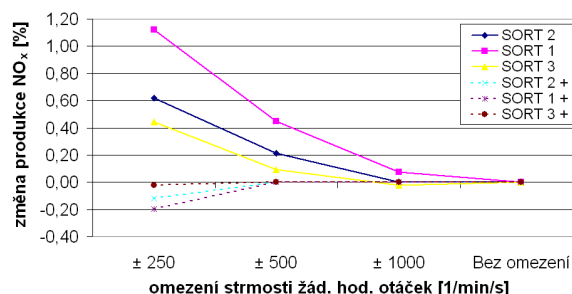
Kvůli možnosti porovnání výsledků nezávisle na jízdním cyklu a použité trajektorii byly výsledky ze simulací převedeny do relativních hodnot (procent). A to tak, že jsou všechny výsledky vztaheny vždy k hodnotám spotřeby paliva, resp. produkci NO_x nebo PM, dosaženým u vypnuté otáčkové rampy, tj. případ, kdy strmost žádané hodnoty otáček není omezoována.

Symbolem „+“ v legendách grafů jsou vyznačeny případy, kdy byl otáčkovou rampou omezován pouze nárůst žádané hodnoty otáček, pokles omezován nebyl. Kladné hodnoty představují zvýšení a záporné hodnoty naopak snížení spotřeby/produkce emisí vůči variantě s vypnutou otáčkovou rampou.

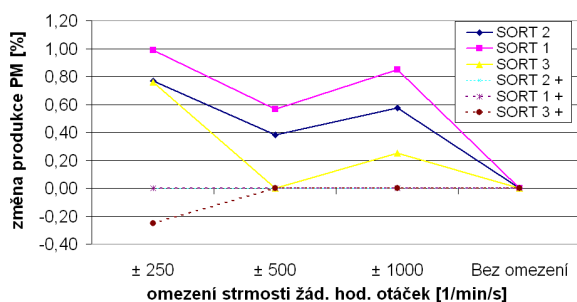
Spojité trajektorie č. 1



Obr. 5.44 Vliv omezení strmosti žádané hodnoty otáček na spotřebu paliva (spojité trajektorie č. 1)



Obr. 5.45 Vliv omezení strmosti žádané hodnoty otáček na produkci NO_x (spojité trajektorie č. 1)



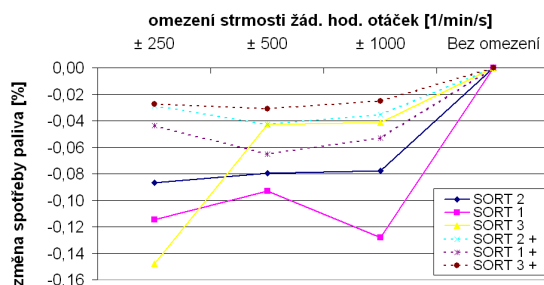
Obr. 5.46 Vliv omezení strmosti žádané hodnoty otáček na produkci PM (spojité trajektorie č. 1)

Omezení strmosti nemá u spojitě trajektorie takřka žádný vliv na spotřebu paliva. Jinak je tomu u produkce emisních složek NO_x a PM. Zde závisí, zda je strmost omezena pouze v kladném směru (nárůst otáček) nebo v obou směrech (pokles i nárůst otáček). Pokud je omezoována v obou směrech, což se až doposud ve všech simulačních scénářích praktikovalo, dochází k opačnému trendu, než který byl předpokládán. Produkce NO_x a PM se zvyšuje s rostoucím omezením v otáčkové rampě. Příčinu tohoto chování lze vysvětlit. Pokud dojde ke skokovému poklesu žádané hodnoty otáček, skutečné otáčky motoru neklesají okamžitě, ale po pomalé rampě. Během této doby se vyprodukuje více škodlivých

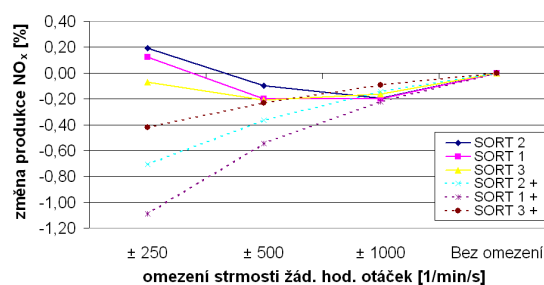
emisí, než kdyby byla otáčková rampa vyřazena z činnosti. Toto chování bylo vysledováno z průběhů spotřeby paliva v čase při různých nastaveních otáčkové rampy. Ke skokovým změnám žádané hodnoty otáček dochází při náhlém poklesu žádané hodnoty výkonu. V jízdních cyklech SORT je to v momentě, kdy vozidlo přechází ze zrychlování do jízdy s ustálenou rychlostí nebo začíná zpomalovat.

V případě kdy je omezována pouze strmost při nárůstu žádané hodnoty otáček, dochází naopak k menší produkci emisí NO_x i PM. Při nastavení malé strmosti otáčkové rampy (250 1/min/s) je omezen přechodný děj spalovacího motoru. Úspora, kterou se tímto dosáhne je ovšem poměrně zanedbatelná, do 0,3 % u NO_x i PM. Při větších strmostech otáčkové rampy již není úspora patrná vůbec díky tomu, že derivace žádané hodnoty výkonu, od kterých jsou odvislé derivace (a tedy strmosti) žádané hodnoty optimálních otáček, jsou v jízdních cyklech SORT poměrně malé. U trapéz v druhé třetině cyklů dosahují strmosti žádané hodnoty otáček hodnot cca 62 až 187 1/min/s, pouze u první trapézy se vyskytuje strmost cca 474 1/min/s a to navíc pouze v cyklech SORT 2 a 3. Pokud je otáčková rampa nastavena na strmost vyšší, nebrání v průchodu signálu a nijak se v simulaci neprojeví. Z tohoto pohledu by bylo vhodné provést simulace s jinými průběhy výkonu (resp. jízdního cyklu), ve kterých budou obsaženy prudší změny výkonu a tudíž i následné prudší změny žádané hodnoty optimálních otáček, aby se lépe ověřil vliv nastavení otáčkové rampy na spotřebu paliva a emise.

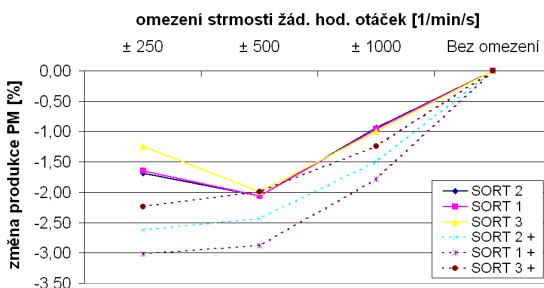
Schodovitá trajektorie č. 4



Obr. 5.47 Vliv omezení strmosti žádané hodnoty otáček na spotřebu paliva (schodovitá trajektorie č. 4)



Obr. 5.48 Vliv omezení strmosti žádané hodnoty otáček na produkci NO_x (schodovitá trajektorie č. 4)



Obr. 5.49 Vliv omezení strmosti žádané hodnoty otáček na produkci PM (schodovitá trajektorie č. 4)

U schodovitých trajektorií jsou výsledky mírně odlišné. S s rostoucí hodnotou omezení strmosti otáčkové rampy mírně klesá spotřeba paliva (Obr. 5.47). Totéž lze tvrdit o produkci NO_x a PM,

Univerzita Pardubice Dopravní fakulta Jana Pernera	Dizertační práce	121
---	------------------	-----

u kterých lze dosáhnout úspor dokonce v jednotkách procent. Není příliš velký rozdíl pokud se omezuje nárůst i pokles žádané hodnoty nebo pouze nárůst. Pokud je omezen pouze nárůst žádané hodnoty otáček, je z výsledků patrný jednoznačný trend, kdy s nižší strmostí klesá i produkce emisí a lze docílit i vyšších úspor.

Na závěr lze konstatovat, že v případě použití spojitě trajektorie je vhodné omezovat strmost žádané hodnoty otáček pouze v kladném směru. U schodovité trajektorie je možné použít omezení v obou směrech, přičemž lepší výsledky dává také omezení strmosti pouze v kladném směru. S rostoucím omezením velmi nepatrně klesá spotřeba paliva. K poklesu produkce NO_x a PM dochází ve větší míře, a to řádově až několik procent.

5.6 SCÉNÁŘ Č. 5 – SPALOVACÍ MOTOR V REŽIMU STOP AND GO

Účelem tohoto simulačního scénáře je vyzkoušení SM v provozu „Stop and Go“ a zjištění výše dosažených úspor paliva.

Test byl proveden pouze v jízdním cyklu SORT 2 se spojitou trajektorií č. 1 a schodovitou č. 4. K vypnutí SM docházelo v úsecích s nulovou rychlostí. SM byl startován startérem.

Výsledky tohoto simulačního scénáře mají pouze orientační charakter, protože vypínání SM je v hybridním vozidle velmi úzce spjato s celkovou strategií řízení celého hybridního pohonu. To znamená, že je nutné brát ohled na stav nabití akumulátorů, na aktuální odběr výkonu pomocných spotřebičů apod. V simulačním scénáři zde uvedeném se SM vypne vždy, jakmile vozidlo zastaví, bez uvažování výše uvedených faktorů. Lze si tímto způsobem udělat hrubou představu, kolik lze uspořit paliva, ovšem bez návaznosti na celkovou strategii řízení hybridního vozidla.

U vozidla v modelu se vyplatí zastavit SM tehdy, pokud se za dobu zastávky ušetří minimálně stejné množství paliva jako pro start SM. Množství paliva spotřebovaného v zastávce závisí na zatížení SM ve volnoběhu od spotřebičů. Ve všech simulacích bylo nastaveno konstantní zatížení spotřebiči o hodnotě 5,1 kW. Hodinová spotřeba paliva ve volnoběhu, která odpovídá tomuto zatížení, činí 2,06 l/h, respektive 0,476 g/s. Množství paliva spotřebovaného pro start SM činí 0,582 g. Jednoduchým podílem těchto dvou hodnot vypočteme minimální souvislou dobu stání, pro kterou se již vyplatí vypnout SM. Ta činí $1,075 / 0,476 = 2,26$ s. Vzhledem k tomu, že v jízdních cyklech SORT jsou zastávky dlouhé minimálně 10 s, vyplatí se SM vypínat vždy.

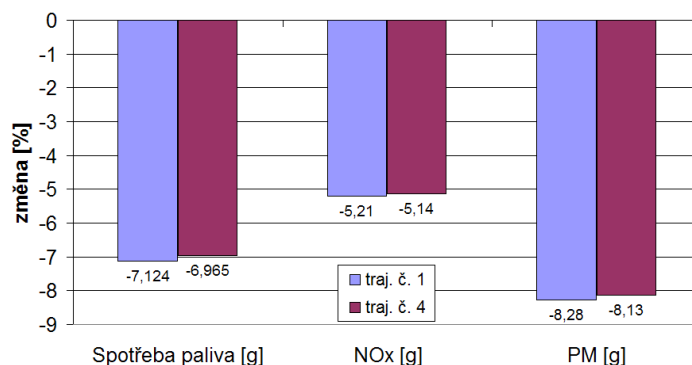
Nastavení simulace:

- Odběr spotřebičů konstantních 5,1 kW
- Dynamická korekce emisí v modelu SM zapnuta
- Konstanty PI regulátoru otáček SM: $K_p = 1$, $K_i = 1$
- Omezení strmosti žádané hodnoty otáček do regulátoru otáček na +500 1/min/s (omezení pouze při nárůstu žádané hodnoty otáček, jejich pokles neomezován)
- Rezerva maximálního výkonu = 3 % z aktuální hodnoty max. výkonu při daných otáčkách
- Rezerva na dynamický výkon závislá na otáčkách a nastavené strmosti otáčkové rampy

- Hystereze výkonu = 10 kW (konstantní, nezávislá na pracovním bodě) – pouze u schodovité trajektorie
- Prodleva 2 s na start motoru

5.6.1 VÝSLEDKY SIMULACÍ

Výsledky jsou udány v procentech změny spotřeby paliva a produkce emisí vztažených vůči normální jízdě vozidla v cyklu SORT 2, kdy nedochází k vypínání SM v zastávkách. Kladné hodnoty znamenají navýšení, záporné snížení sledovaného parametru.

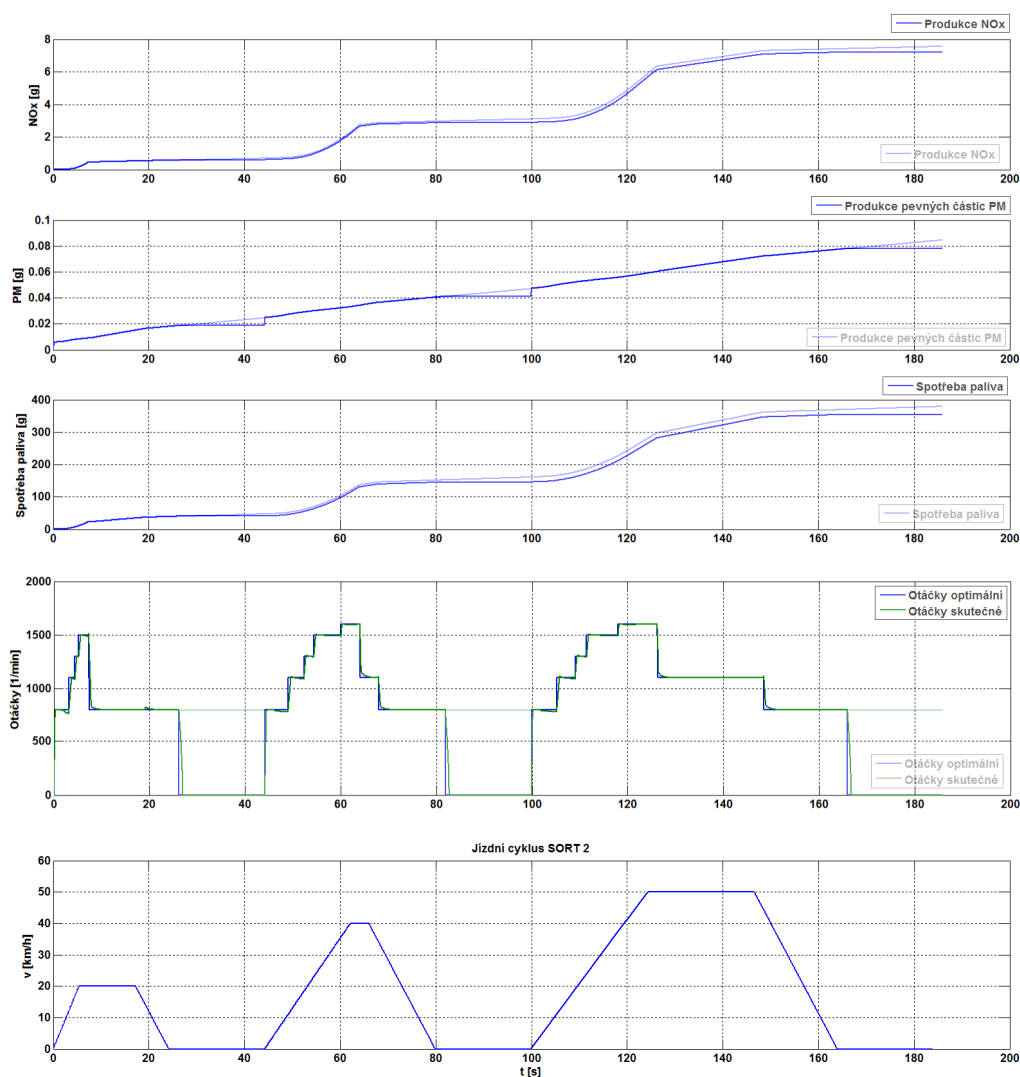


Obr. 5.50 Úspory dosažené vypínáním SM v zastávkách

Při vypínání SM v zastávkách dojde k úspoře paliva o velikosti cca 7 %, produkce NO_x klesne o cca 5 %, produkce pevných částic PM klesne o cca 8 %.

Během startu motoru (2 sekundy) je vyprodukováno 6,383 mg pevných částic. V porovnání s tím je během chodu motoru ve volnoběhu při zátěži 5,1 kW ve 20 sekundové zastávce vyprodukováno cca 6,81 mg pevných částic. V jízdním cyklu SORT 2 jsou tyto zastávky celkem tři a stejně dlouhé. Během nich motor vyprodukuje $3 \times 6,81 \text{ mg} = 20,43 \text{ mg}$ pevných částic. Jízdní cyklus obsahuje dva dodatečné starty během kterých se navíc vyprodukuje $2 \times 6,383 \text{ mg} = 12,766 \text{ mg}$ pevných částic.

Je zřejmé, že i přes opětovné startování došlo k úspoře, produkce PM se snížila o $20,43 \text{ mg} - 12,766 \text{ mg} = 7,664 \text{ mg}$.



Obr. 5.51 Provoz SM v režimu Stop and Go
(sytě – vypínání SM v zastávkách, bledě – běžný provoz)

Vypínáním SM v zastávkách lze dosáhnout nezanedbatelných úspor paliva v jednotkách procent v závislosti na délce zastávky.

Produkce emisí silně závisí na průběhu startu. V tomto simulačním scénáři došlo ke zmenšení produkce NO_x i PM. Nemusí tomu být vždy, závisí na počtu startů a souhrnné délce zastávek s vypnutým motorem. V reálném vozidle bude SM startován el. generátorem, nikoliv startérem. Pokud by el. generátor roztočil SM až do volnoběžných otáček, došlo by k překlenutí nepříjemné startovní fáze SM by během startu nespotřebovával žádné palivo ani neprodukoval žádné emise. Otázkou je, zda je to energeticky výhodnější. Bude záviset na účinnosti v přenosové cestě akumulátor-měniče-PMSG-SM ve fázi startování (energie odebíraná z akumulátorů) a na účinnosti v opačném směru (dobití akumulátorů po startu na stejnou energetickou hladinu jako před startem). Na toto téma byla provedena krátká studie, jejíž výsledky jsou uvedeny v příloze č. 4.

Při praktické implementaci režimu Stop and Go je nutné vzít v úvahu i požadavky systému úpravy spalin, jehož efektivnost je závislá na teplotě výfukových spalin a tudíž i na délce vypnutí motoru. Tato vlastnost není modelována.

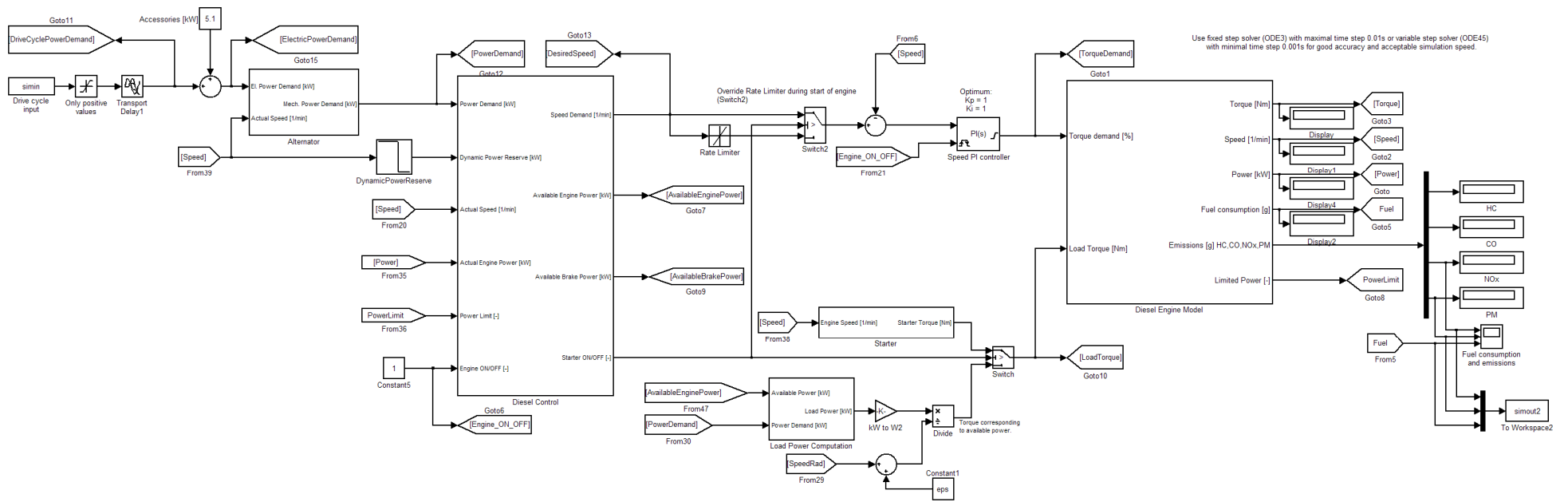
Univerzita Pardubice Dopravní fakulta Jana Pernera	Dizertační práce	124
---	------------------	-----

6. SIMULACE CHODU CELÉHO SOUSTROJÍ

Po provedení simulací optimálního chodu samotného spalovacího motoru je nyní účelné provést obdobné simulace, ale již s připojeným alternátorem ke spalovacímu motoru.

Simulace nebyly prováděny ve stejném rozsahu jako v předchozí kapitole. Byl vytvořen pouze jeden simulační scénář, ve kterém byl porovnán chod celého soustrojí vůči samotnému SM. Byla porovnána spotřeba paliva a produkce emisí a byl analyzován přínos optimalizace chodu celého soustrojí vůči optimalizaci chodu samotného SM. Simulace byly prováděny v jízdních cyklech SORT 1 až SORT 3 a NYCC.

6.1 SIMULAČNÍ MODEL CELÉHO SOUSTROJÍ



Obr. 6.1 Blokové schéma simulačního modelu celého soustrojí

Univerzita Pardubice Dopravní fakulta Jana Pernera	Dizertační práce	126
---	------------------	-----

6.1.1 POPIS SIMULAČNÍHO MODELU

Simulační model celého soustrojí je ve svém základu naprosto stejný jako simulační model samotného SM. Původní simulační model byl doplněn o zjednodušený modelu alternátoru. Ten se nalézá na vstupu modelu optimální jednotky řízení SM *DieselControl*. V Obr. 6.1 je model alternátoru označen jako *Alternator*.

V simulacích představuje trakční výkon v jízdním cyklu žádanou hodnotu el. výkonu, který musí dodat PMSG. Účinnost přenosu výkonu elektrické části za usměrňovačem není uvažována (stejně jako tomu bylo v případě simulace samotného SM).

Žádaná hodnota el. výkonu je vyčítána z jízdního cyklu, sčítána s odběrem pomocných spotřebičů a zavedena do bloku *Alternator*, ve kterém je vypočten mechanický příkon, kterým alternátor (PMSG + pulzní usměrňovač) zatěžuje spalovací motor. Vypočtená hodnota mechanického příkonu je žádanou hodnotou výkonu SM, která vstupuje do jednotky optimálního řízení SM *DieselControl*.

Pokud není překročen max. výkon spalovacího motoru, je spalovací motor v každém okamžiku zatěžován žádanou hodnotou výkonu.

6.2 SCÉNÁŘ Č. 6 – POROVNÁNÍ CHODU CELÉHO SOUSTROJÍ VŮČI SAMOTNÉMU SM

Nastavení simulace (nastavení je stejné jako u scénáře č. 2 v simulaci chodu samotného SM):

- Odběr spotřebičů konstantních 5,1 kW.
- Dynamická korekce emisí v modelu SM zapnuta
- Konstanty PI regulátoru otáček SM: $K_p = 1$, $K_i = 1$
- Omezení strmosti žádané hodnoty otáček do regulátoru otáček na ± 500 1/min/s
- Rezerva maximálního výkonu = 3 % z aktuální hodnoty max. výkonu při daných otáčkách
- Rezerva na dynamický výkon = 10 kW (konstantní, nezávislá na pracovním bodě)
- Hystereze výkonu = 10 kW (konstantní, nezávislá na pracovním bodě) – pouze u schodovitých trajektorií

6.2.1 POUŽITÉ TRAJEKTORIE

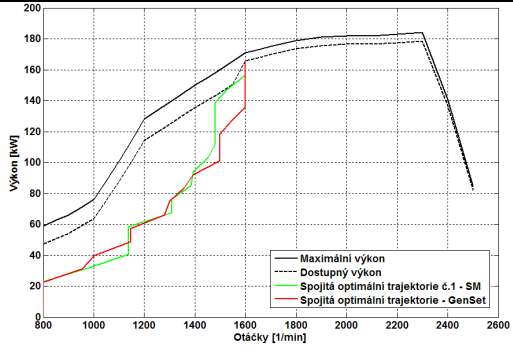
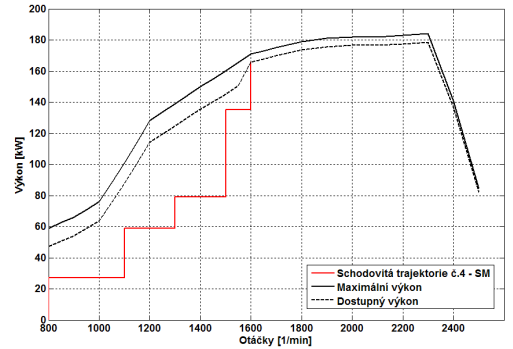
Za účelem zjištění vlivu optimalizace celého soustrojí byly sestrojeny dvě nové optimální trajektorie. První z nich je spojitá trajektorie, která byla vytvořena na základě úplné charakteristiky celého soustrojí. Vznikla modifikací úplné charakteristiky SM do níž se promítl účinnost alternátoru (viz kapitola 3.6.1). Tato spojitá trajektorie dostala označení č. 1g.

Druhá optimální charakteristika je schodovitá, která vznikla nahrazením spojitě optimální charakteristiky soustrojí intervaly výkonu. Tato schodovitá charakteristika má označení č. 9 a byla dynamicky optimalizována na jízdní cyklus SORT 2 a celé soustrojí.

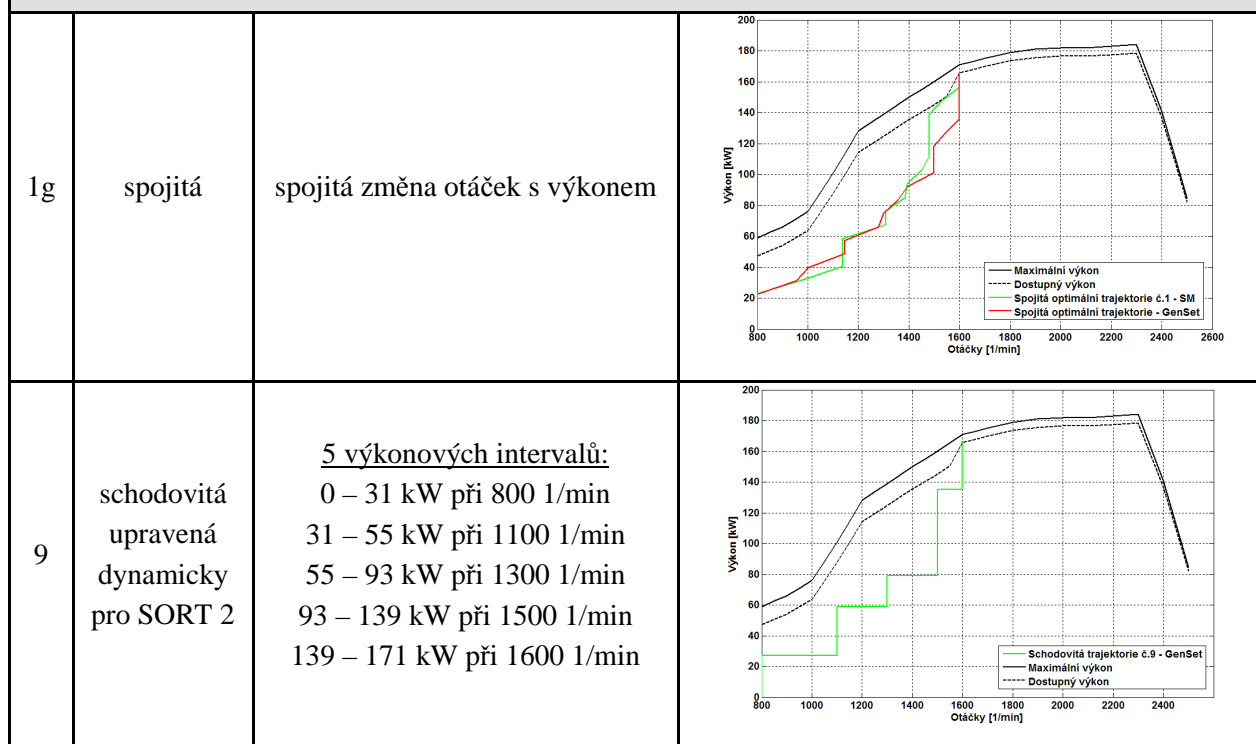
Účelem analýzy je stanovení přínosu optimalizace chodu celého soustrojí vůči optimalizaci chodu samotného SM a stanovení rozdílů ve spotřebě paliva a produkci emisí pokud dojde k zanedbání účinnosti alternátoru. Za tímto účelem byly výsledky simulací v tomto scénáři porovnávány s výsledky simulací chodu samotného SM, ve kterých byla použita spojitá optimální trajektorie č. 1 a schodovitá č. 4, obě optimalizovány pro samotný chod SM.

Seznam všech použitých trajektorií v tomto scénáři je uveden v Tab. 6.1.

Tab. 6.1 Trajektorie použité v simulačním scénáři č. 6

č.	Typ trajektorie	Popis tvaru trajektorie	Grafická podoba
<i>Trajektorie optimalizované pro chod samotného SM</i>			
1	spojitá	spojitá změna otáček s výkonem	
4	schodovitá upravená dynamicky pro SORT 2	<u>5 výkonových intervalů:</u> 0 – 27 kW při 800 1/min 27 – 59 kW při 1100 1/min 59 – 79 kW při 1300 1/min 79 – 135 kW při 1500 1/min 135 – 171 kW při 1600 1/min	

Trajektorie optimalizované pro chod celého soustrojí (SM + PMSG + pulzní usměrňovač)



6.2.2 VÝSLEDKY SIMULACÍ

Spotřeba paliva

Nejprve k vlivu připojeného alternátoru (PMSG + pulzní usměrňovač) na spotřebu paliva celého soustrojí.

Byla provedena simulace chodu celého soustrojí napříč všemi jízdními cykly. V simulacích byla použita spojitá trajektorie č. 1, optimalizovaná na minimální spotřebu paliva pouze samotného SM, aby bylo možné porovnat výsledky s chodem samotného SM.

Bylo zjištěno, že připojením alternátoru SM dojde vlivem zhoršené celkové účinnosti soustrojí k průměrnému navýšení celkové spotřeby paliva v jízdním cyklu o cca 8 % (Tab. 6.2 a Tab. 6.3).

Tab. 6.2 Scénář č. 6 - celková spotřeba paliva [g] – rozdíly vůči chodu samotného SM

	SORT 1	SORT 2	SORT 3	NYCC
Chod samotného SM spotřeba paliva [g]	249,32	380,73	555,54	957,81
Chod celého soustrojí spotřeba paliva [g]	273,69	411,59	595,07	1037,02
Nárůst spotřeby paliva vůči chodu samotného SM [%]	9,772	8,107	7,115	8,270

Tab. 6.3 Scénář č. 6 - celková spotřeba paliva [l/100km] – rozdíly vůči chodu samotného SM

	SORT 1	SORT 2	SORT 3	NYCC
Chod samotného SM spotřeba paliva [l/100km]	57,767	49,859	46,160	60,799
Chod celého soustrojí spotřeba paliva [l/100km]	63,412	53,901	49,445	65,828
Nárůst spotřeby paliva vůči chodu samotného SM [%]	9,772	8,107	7,115	8,270

Nyní k vlivu optimalizace chodu celého soustrojí za účelem dosažení minimální spotřeby paliva.

Z výsledků simulací (Tab. 6.4) vyplývá, že s trajektoriemi optimalizovanými na chod celého soustrojí (č. 1g a 9) se dosahuje lepších výsledků než s trajektoriemi optimalizovanými pouze na chod samotného SM (č. 1 a 4). **Úspory jsou ovšem zanedbatelné, optimalizace chodu celého soustrojí nepřináší žádné výrazné úspory paliva vůči samotné optimalizaci chodu SM.** Rozdíl mezi spojitými trajektoriemi č. 1g a č. 1 je pouze 0,025 %, rozdíl mezi schodovitými trajektoriemi č. 9 a č. 4 je 0,229 %, tedy rozdíly naprosto zanedbatelné. **Tím se potvrdil předpoklad vyslovený v kapitole 3.6.1.** Z toho lze usuzovat, že stačí optimalizovat chod samotného SM bez uvažování připojeného PMSG s pulzním usměrňovačem. Tento vyslovený závěr je platný pouze v těch případech, když jsou si charakteristiky účinnosti SM a PMSG tvarově podobné.

Tab. 6.4 Scénář č. 6 – spotřeba paliva a další ukazatele, jízdní cyklus SORT 2

Trajektorie č.	Spotřeba paliva za jízdní cyklus [g]	Spotřeba paliva [l/100km]	Nárůst spotřeby vůči trajektorii č. 1g [%]	Četnost pracovních bodů SM v optimální oblasti [%]	Spotřeba paliva v optimální oblasti [%]	Do zátěže odvedená práce v jízdním cyklu [kWh]
1g	411,49	53,888	0,000	91,59	89,61	2,003
1	411,59	53,901	0,025	72,16	51,55	2,004
9	412,56	54,028	0,235	67,41	53,09	2,003
4	413,50	54,152	0,464	67,90	55,15	2,004

Náhrada spojitě trajektorie č. 1g schodovitou č. 9 (obě optimalizované na chod celého soustrojí a min. spotřebu paliva) vedla k mírnému zvýšení spotřeby paliva o 0,235 %.

Produkce emisí

Simulace byly provedeny stejným způsobem jako u analýzy spotřeby paliva.

Nejprve k vlivu připojeného PMSG + pulzního usměrňovače na produkci emisí.

Stejně jako u spotřeby paliva i u celkové produkce NO_x a PM došlo k jejímu zvýšení. Průměrné zvýšení produkce je u obou složek takřka stejné a dosahuje cca 9 %, tedy stejná hodnota jako u nárůstu spotřeby paliva, Tab. 6.5 a Tab. 6.6.

Tab. 6.5 Scénář č. 6 - celková produkce NO_x [g] – rozdíly vůči chodu samotného SM

	SORT 1	SORT 2	SORT 3	NYCC
Chod samotného SM produkce NO_x [g]	4,722	7,785	11,944	19,172
Chod celého soustrojí produkce NO_x [g]	5,281	8,456	12,917	20,781
Nárůst produkce NO_x vůči chodu samotného SM [%]	11,838	8,619	8,146	8,392

Tab. 6.6 Scénář č. 6 - celková produkce PM [g] – rozdíly vůči chodu samotného SM

	SORT 1	SORT 2	SORT 3	NYCC
Chod samotného SM produkce PM [g]	0,0723	0,0847	0,0972	0,3539
Chod celého soustrojí produkce PM [g]	0,0798	0,0925	0,1039	0,3772
Nárůst produkce PM vůči chodu samotného SM [%]	10,373	9,209	6,893	6,584

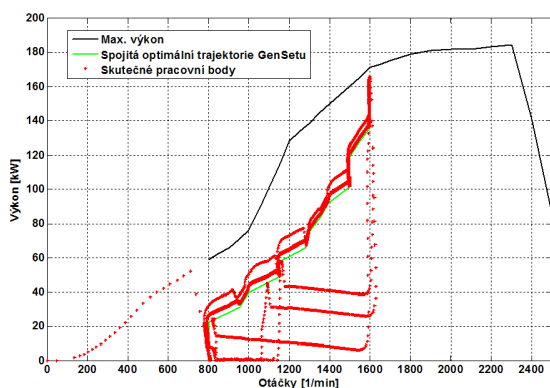
Optimalizace chodu celého soustrojí za účelem dosažení minimální spotřeby paliva měla pozitivní dopad i na celkovou produkci emisí NO_x a PM. Došlo k velmi mírnému, takřka zanedbatelnému snížení produkce obou složek, a to v průměru o několik desetin procenta (Tab. 6.7, porovnej trajektorie č. 1g s č. 1 a č. 9 s č. 4).

Tab. 6.7 Scénář č. 6 – produkce emisí, jízdní cyklus SORT 2

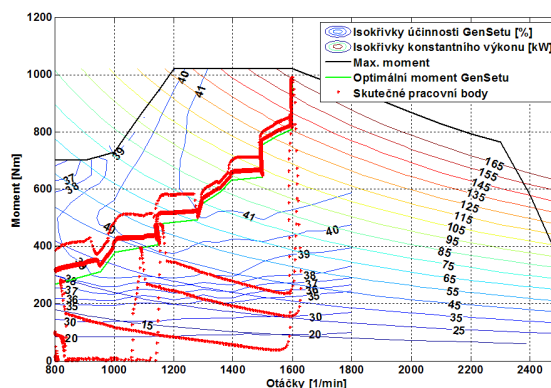
Trajektorie č.	Produkce NO _x [g]	Produkce PM [g]	Nárůst produkce NO _x vůči trajektorii č. 1g [%]	Nárůst produkce PM vůči trajektorii č. 1g [%]	Do zátěže odvedená práce v jízdním cyklu [kWh]
1g	8,440	0,0921	0,00	0,00	2,003
1	8,456	0,0925	0,19	0,25	2,004
9	8,559	0,0938	1,41	1,85	2,003
4	8,744	0,0927	3,6	0,65	2,004

6.2.3 GRAFICKÉ VÝSTUPY ZE SIMULACÍ

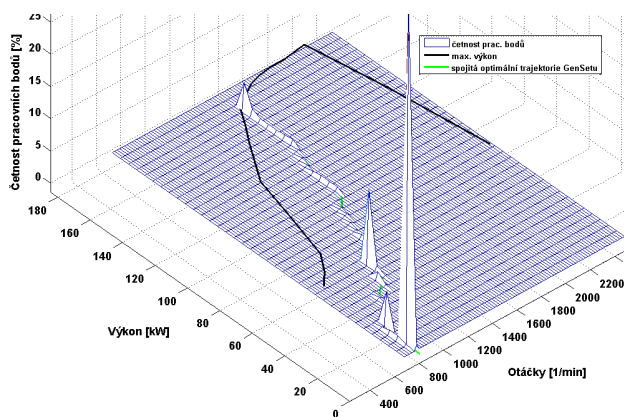
V této podkapitole jsou prezentovány výsledky ze simulací v grafické podobě. Průběhy zde uvedené odpovídají případu, kdy byla použita spojitá trajektorie č. 1g celého soustrojí v jízdním cyklu SORT 2.



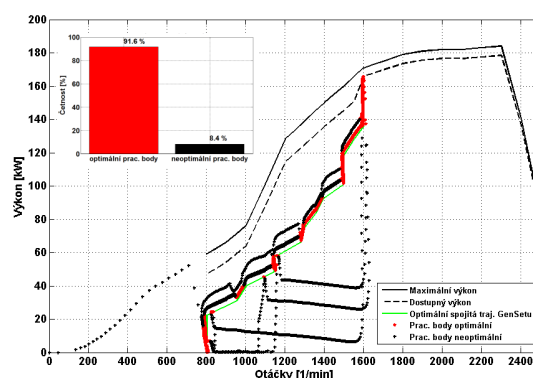
Obr. 6.2 Pracovní body výkonu v jízdním cyklu (spojitá trajektorie č. 1g)



Obr. 6.3 Pracovní body momentu v jízdním cyklu (spojitá trajektorie č. 1g)



Obr. 6.4 Četnost pracovních bodů výkonu v jízdním cyklu (spojitá trajektorie č. 1g)

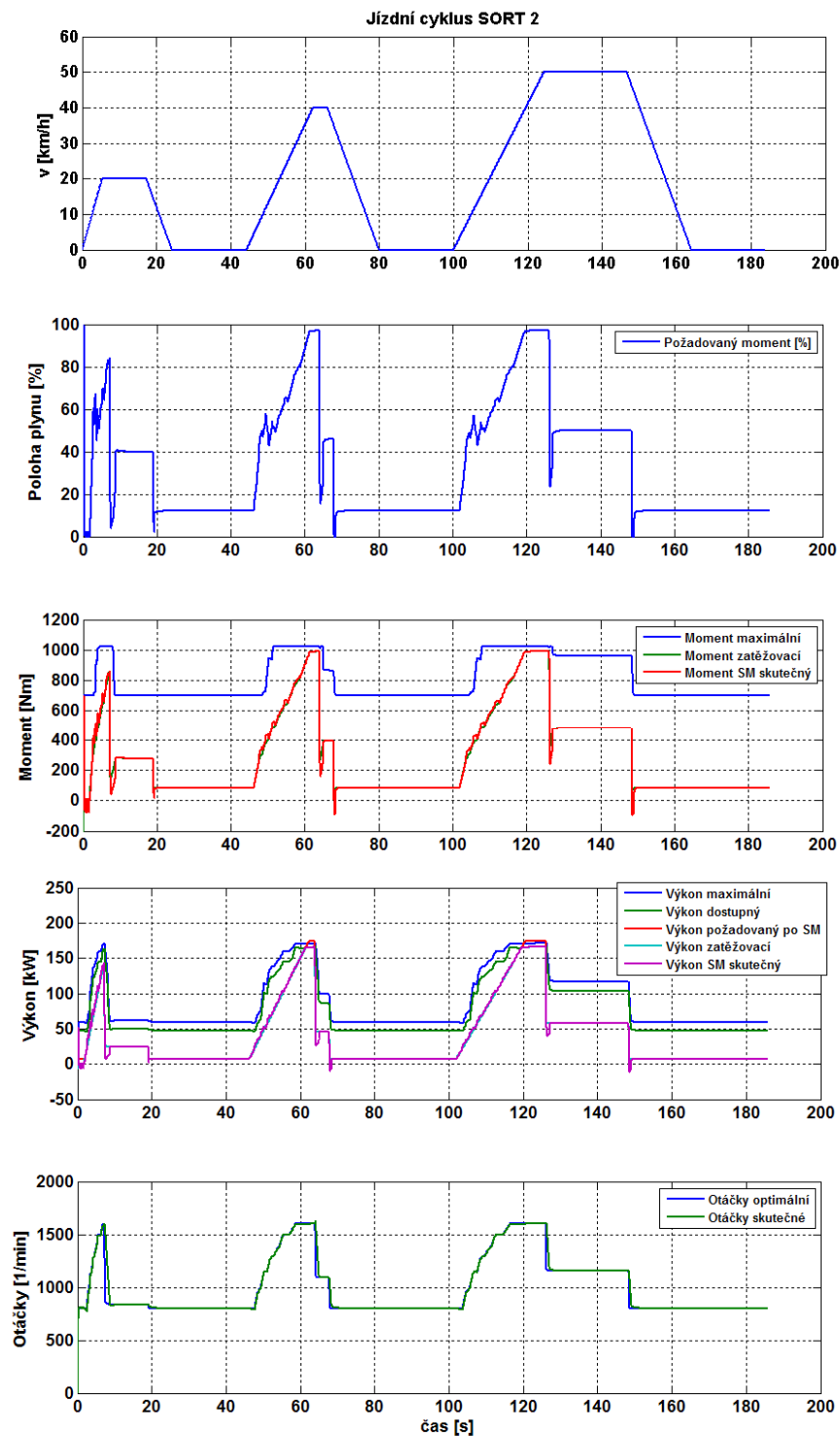


Obr. 6.5 Optimální pracovní body výkonu v jízdním cyklu včetně jejich četnosti (spojitá trajektorie č. 1g)

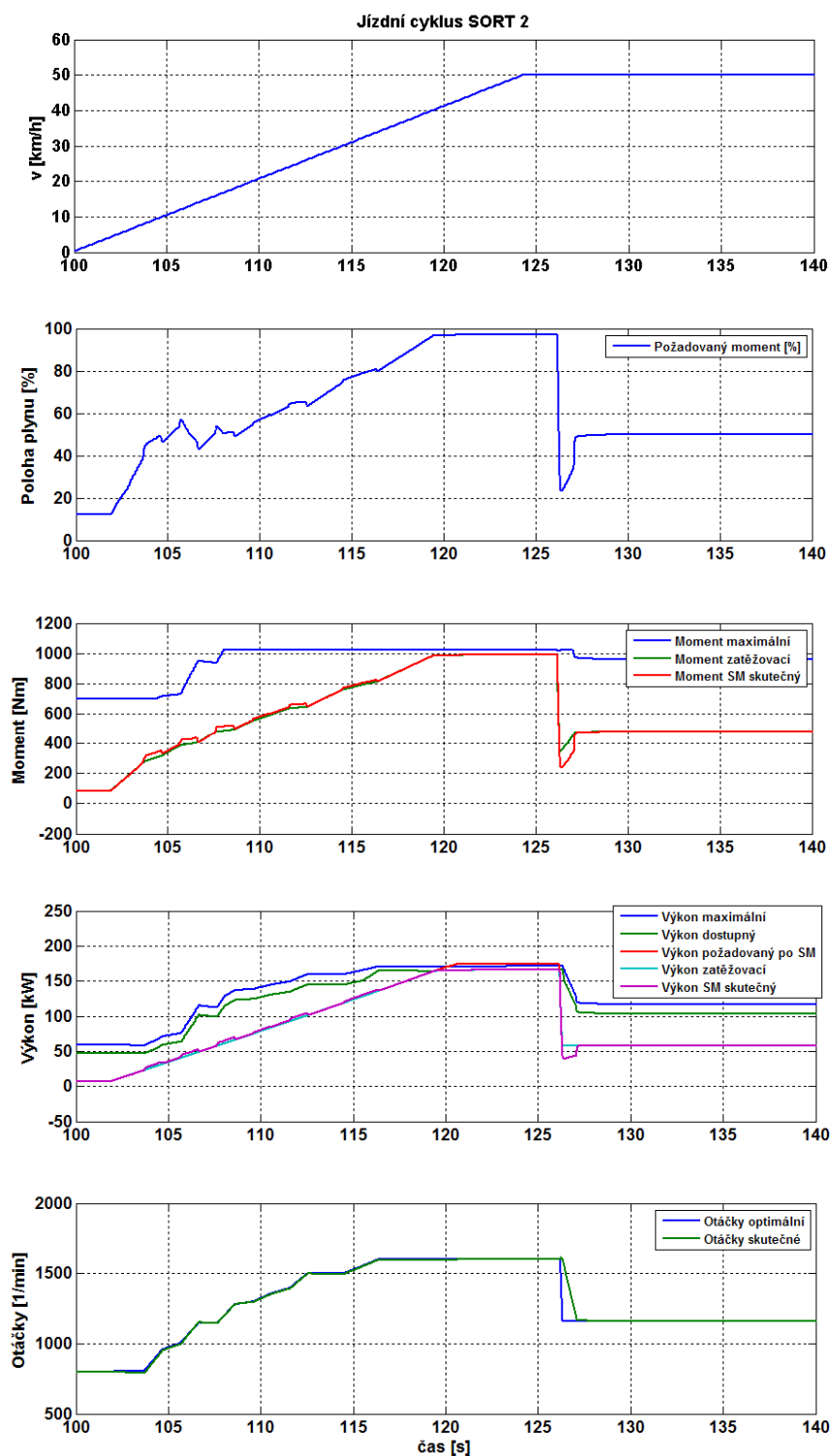
Neoptimální pracovní body se nacházejí mimo zelenou optimální trajektorii.

Největší množství pracovních bodů (a tedy i čas strávený v těchto bodech) se nalézá v okolí hodnot výkonů 7,5; 37,5; 52,5 kW což odpovídá četnosti hodnot výkonů v jízdním cyklu SORT 2 s přihlédnutím ke konstantnímu přitížení 5,1 kW od spotřebičů. Poloha těchto špiček v grafu (Obr. 6.4) je správná – leží přímo na optimální trajektorii. Pouze malé množství bodů leží mimo ni (porovnej Obr. 6.2 s Obr. 6.5).

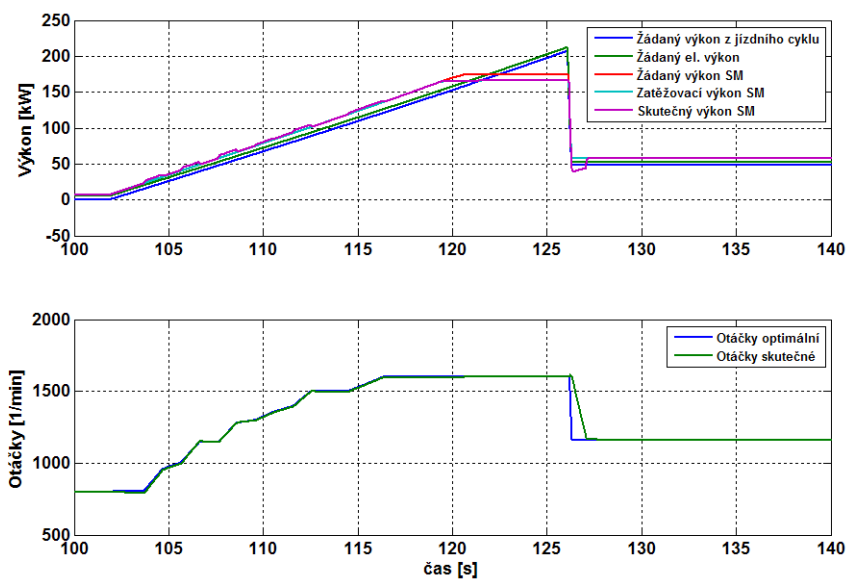
Na níže uvedených časových průbězích je demonstrována správná funkce simulačního modelu.



Obr. 6.6 Průběh momentů, výkonů a otáček během jízdního cyklu SORT 2 (spojitá trajektorie č. 1g celého soustrojí)

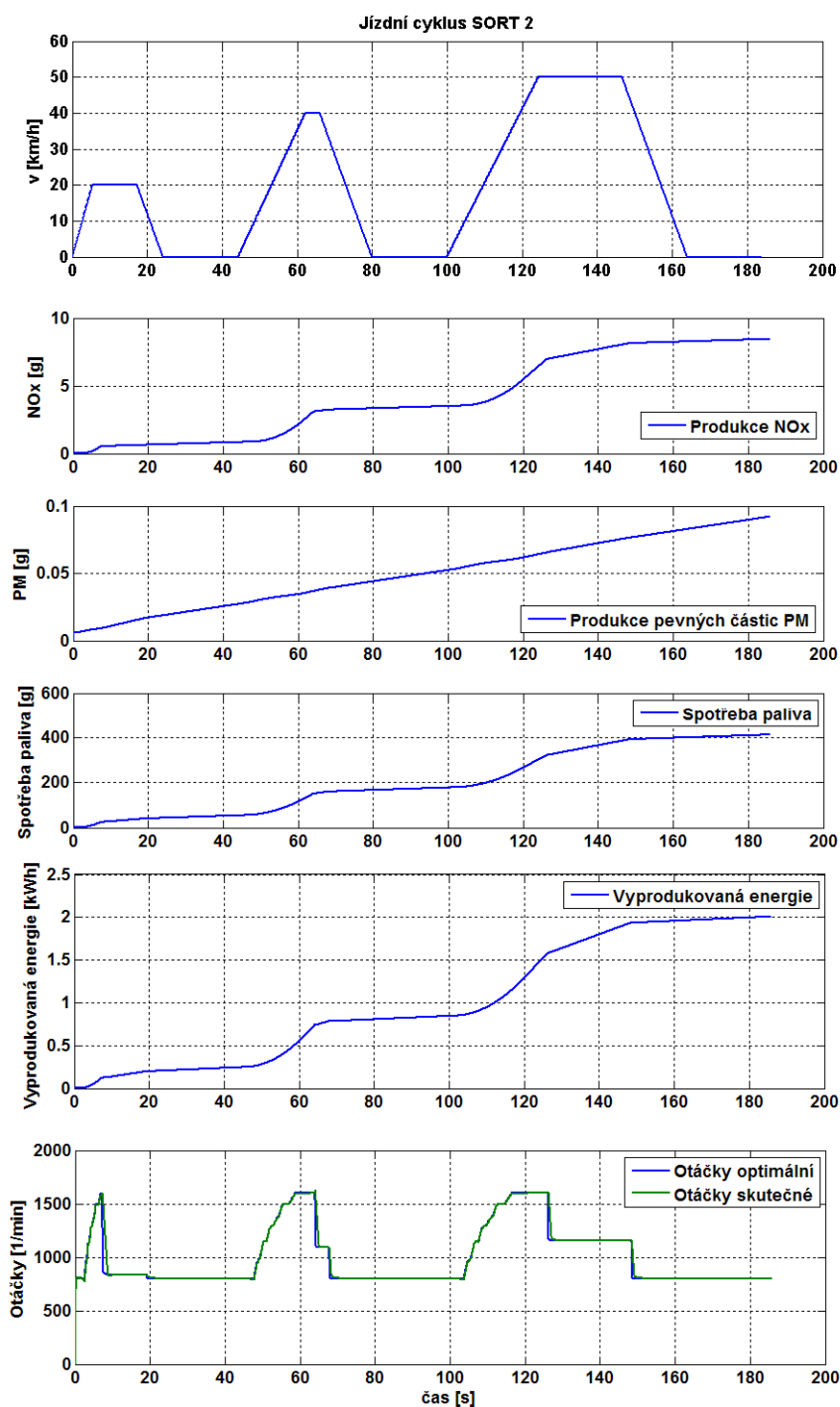


Obr. 6.7 Průběh momentů, výkonů a otáček během jízdního cyklu SORT 2
DETAIL 100. až 140. sekundy
(spojitá trajektorie č. 1g celého soustrojí)



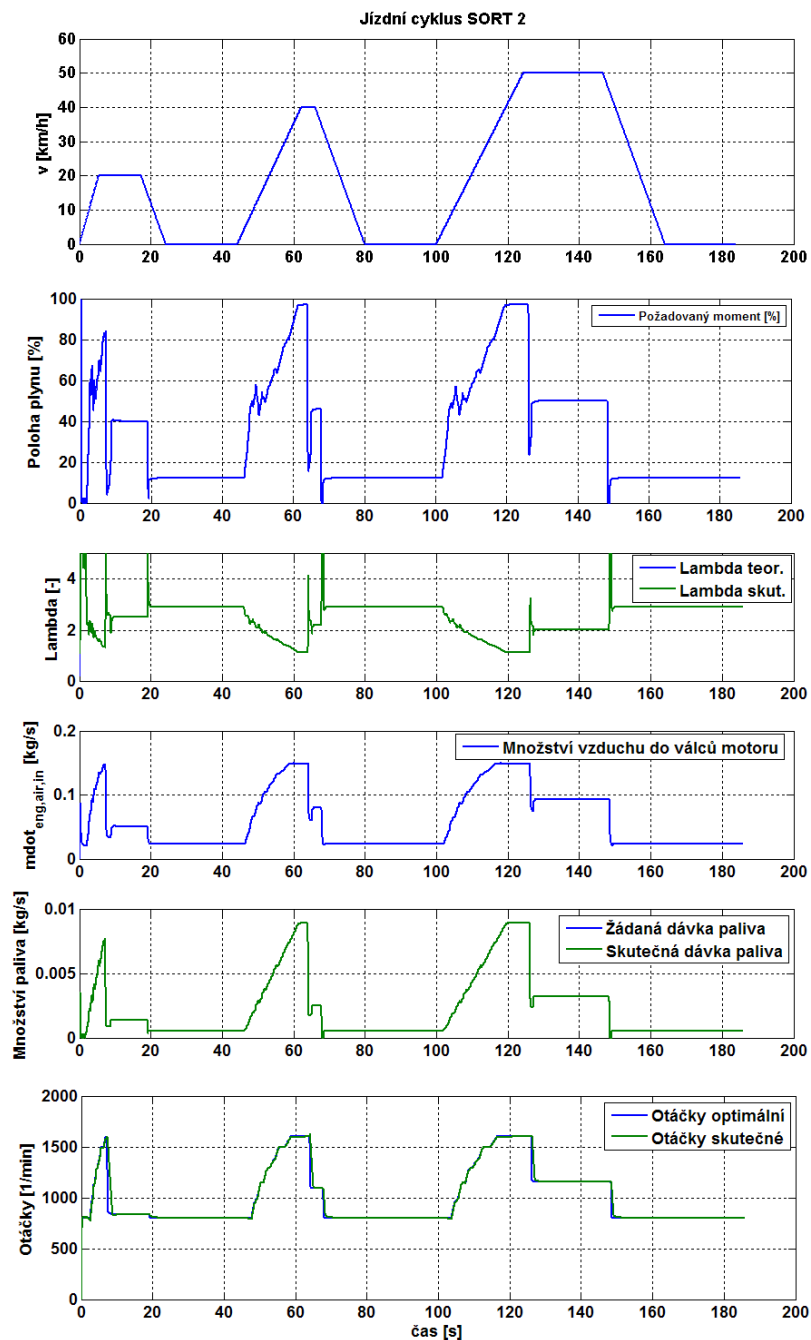
Obr. 6.8 Detail průběhu všech výkonů v simulaci
(spojitá trajektorie č. 1g celého soustrojí)

Průběhy výkonů odpovídají simulačnímu schématu celého soustrojí (Obr. 6.1). Nyní k popisu Obr. 6.8. K žádanému výkonu z jízdního cyklu (modrá) se přičítá el. odběr pomocných spotřebičů, jejich součet je žádaný el. výkon (zelená), který je odebírán za usměrňovačem. Po SM je žádán výkon vyšší, díky nejednotkové účinnosti alternátoru (červená). SM je zatěžován tímto žádaným výkonem (světle modrá), pokud je ho schopen dodat. Pokud je žádaný výkon vyšší než je SM schopen dodat, dodává pouze výkon, který je schopen v dané chvíli vyprodukovat. V grafu na Obr. 6.8 této situaci odpovídá časový interval od 120. do 126. sekundy.



Obr. 6.9 Průběhy produkce emisí a spotřeby paliva během jízdního cyklu SORT 2 (spojitá trajektorie č. 1g celého soustrojí)

Kumulovaná produkce emisí i spotřeba paliva dle očekávání prudce roste v intervalech jízdy s vyšším výkonem. V intervalu, kdy vozidlo stojí, je dodáván pouze výkon do pomocných spotřebičů a palivo je spotřebováváno pomaleji.



Obr. 6.10 Průběhy vybraných veličin spalovacího motoru během jízdního cyklu SORT 2 (spojitá trajektorie č. 1g celého soustrojí)

S nárůstem žádaného výkonu roste množství nasávaného vzduchu do válců motoru a množství vstříkovaného paliva. Součinitel přebytku vzduchu lambda klesá, ale drží se nad limitní hodnotou $\lambda_{\min} = 1,1$, při které by nastalo omezení dávky paliva a tím by došlo ke snížení výkonu motoru. Tato situace zde ovšem nenastává. Množství nasávaného vzduchu stačí sledovat pomalé změny žádaného výkonu (a tedy změny žádané hodnoty otáček), takže nikde během jízdy nedochází k omezení množství paliva s ohledem na pokles součinitele přebytku vzduchu λ pod limitní hodnotu $\lambda_{\min} = 1,1$ (s ohledem na omezení kouřivosti motoru), tudíž korekce emisí se v této konkrétní simulaci neuplatňují.

7. SOUHRN DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

V této kapitole jsou uvedeny nejdůležitější závěry a doporučení k provozu SM, které vycházejí z výsledků provedených simulací. Podrobnější diskuse k jednotlivým tématům čtenář nalezne ve výsledcích simulací u jednotlivých simulačních scénářů.

Výsledek optimalizace zatěžovací charakteristiky pro dosažení minimální spotřeby paliva se zahrnutím dynamického provozu SM je ovlivněn výběrem jízdního cyklu, respektive průběhem požadovaného výkonu v čase. Rozdíly mezi všemi testovanými optimálními trajektoriemi v různých jízdních cyklech byly ovšem malé, cca do 1 % spotřeby paliva. Spojitá trajektorie, tj. optimální zatěžovací charakteristika sestavená z úplné charakteristiky SM, poskytuje vždy nejlepší výsledky, ale rozdíl vůči schodovitým trajektoriím je zanedbatelný.

Předpoklad úspory paliva tím, že SM bude provozován při konstantních otáčkách při měnícím se výkonu (nahrazení optimální spojitě trajektorie schodovitou), byl vyvrácen.

Spalovací motor hybridního autobusu je vhodné provozovat s výkonem nad 1/4 maximálního výkonu, aby příliš neklesala jeho účinnost a nedocházelo ke zvýšení spotřeby paliva.

Emise SM dosahovaly v jízdních cyklech hodnot přípustných pro emisní limit EURO III, což je dáno použitými daty z reálného motoru plnicího emisní normu EURO III. Rozdíly v produkci emisí NO_x a PM mezi použitými trajektoriemi a napříč různými jízdními cykly také nejsou velké. U emisí NO_x byly pozorovány maximální rozdíly do 3 %, u emisí pevných částic PM do 1,3 %.

Hysterezní pásmo u schodovitých trajektorií je vhodné volit co nejmenší, ale s ohledem na minimalizaci počtu přechodů SM na jiné otáčky. Zvětšováním pásma hystereze nad její optimální velikost se pouze zvyšuje spotřeba paliva řádově o desetiny procenta.

Vliv omezení strmosti žádané hodnoty otáček, která vstupuje do regulátoru otáček SM, je pozitivní. S rostoucím omezením strmosti klesá produkce NO_x o několik málo desetin procenta, produkce PM až o několik procent. Spotřeba paliva zůstává stejná. Strmost žádané hodnoty otáček je vhodné omezovat pouze v kladném směru, když žádaná hodnota roste. Pokud klesá, je lepší strmost neomezovat, neboť SM v tomto případě nespotebovává palivo a nevytváří emise.

Provozem SM v režimu „Stop and Go“, tj. vypínáním SM v zastávkách, lze dosáhnout nezanedbatelných úspor paliva v závislosti na délce zastávky. V simulacích bylo dosaženo úspory cca 7 % v jízdním cyklu SORT 2. Došlo i ke snížení produkce emisí NO_x a PM o cca 8 %. Výsledky simulace silně závisí na přesnosti modelu SM ve fázi startu a na zvolené strategii řízení hybridního pohonu jako celku, proto je nutné provést praktické experimenty přímo na vozidle.

Neuvažování alternátoru (el. generátoru s pulzním usměrňovačem) připojeného k SM vede k průměrné chybě ve stanovení absolutních hodnot spotřeby paliva a produkce emisí o velikosti cca 8 % napříč použitými jízdními cykly. Vlivem účinnosti alternátoru menší než jedna dochází ke snížení účinnosti celého soustrojí a ke zvýšení spotřeby paliva a emisí o již zmiňovaných 8 %.

Optimalizace chodu celého soustrojí nepřináší žádné výrazné úspory spotřeby paliva vůči optimalizaci s uvažováním pouze samotného SM. Z toho lze usuzovat, že stačí optimalizovat chod samotného SM bez uvažování připojeného alternátoru. Tento vyslovený závěr je platný pouze v těch případech, když jsou si charakteristiky účinnosti SM a alternátoru tvarově podobné.

8. ZÁVĚR

Důležitým faktorem při tvorbě této práce byla účast autora na projektu sériového hybridního pohonu autobusu vyvíjeného firmou Škoda Electric a.s., kde měl za úkol řešení optimálního řízení primárního zdroje – vznětového spalovacího motoru pro pohon synchronního generátoru s permanentními magnety. Poznatky z této práce jsou aplikovány na toto reálné vozidlo.

Hlavním cílem práce bylo nalezení metodiky optimalizace provozu primární zdrojové soustavy sériového hybridního pohonu s ohledem na minimalizaci měrné spotřeby paliva.

Za tímto účelem byla navržena náhrada optimální zatěžovací charakteristiky spalovacího motoru (vycházející ze tvaru jeho úplné charakteristiky – závislosti měrné spotřeby paliva [g/kWh] na otáčkách a momentu motoru) zatěžovací charakteristikou pracovně nazvanou jako „schodovitá“. Schodovitá zatěžovací charakteristika vznikla z původní optimální zatěžovací charakteristiky (pracovní název „spojitá“) jejím rozdělením do intervalů výkonu, uvnitř kterých motor pracuje při konstantních otáčkách. Podnětem k tomuto rozhodnutí byl požadavek, aby spalovací motor pracoval co nejčastěji při konstantních otáčkách pro omezení přechodových dějů. Tato schodovitá zatěžovací charakteristika byla dále optimalizována na konkrétní jízdní cyklus a nastavení pohonu (velikost hystereze a strmost otáčkové rampy pro omezení přechodových dějů motoru). Dále byl analyzován vliv velikosti hystereze a strmosti otáčkové rampy na spotřebu paliva a produkci emisí. Byl analyzován chod samotného spalovacího motoru a celého soustrojí (spalovací motor + alternátor), ze kterého vyplynul vliv připojeného alternátoru na provozní charakteristiky (spotřebu paliva a emise) celého soustrojí. Analýzy byly prováděny pro čtyři jízdní cykly, jmenovitě SORT 1, SORT 2, SORT3 pro autobusy a NYCC pro osobní vozidla.

Všechny analýzy byly provedeny prostřednictvím simulací v programu Matlab/Simulink. Za tímto účelem byl sestaven model spalovacího motoru, jeho jednotky optimálního řízení a alternátoru, který se skládal z modelu synchronního generátoru s permanentními magnety, pulzního usměrňovače a regulační struktury stejnosměrného napětí. Model alternátoru se po spojení s modelem spalovacího motoru neukázal jako příliš vhodný pro simulace celého soustrojí díky velmi rozdílným časovým konstantám. Model alternátoru díky své složitosti a rychlým elektrickým dějům neúnosně zpomaloval simulace. Proto byl nahrazen zjednodušeným modelem, který reprezentoval pouze účinnost alternátoru v závislosti na otáčkách a momentu, jako hlavní informaci nutnou pro optimalizaci chodu celého soustrojí. Původní regulační struktura napětí, založená na vektorovém řízení momentu PMSG, vykazovala dobré vlastnosti v ustálených i přechodových stavech, jak bylo dokázáno provedenými simulacemi. Vytvořený model spalovacího motoru je typu „mean-value“ a byl naparametrován dostupnými údaji z reálného motoru.

Z provedených analýz vyplývá, že nahrazením „spojité“ optimální zatěžovací charakteristiky (optimalizovaná staticky) „schodovitou“ (optimalizovaná novou metodou) nedojde ve většině studovaných případů k předpokládané úspoře paliva. Rozdíly v celkových spotřebách paliva jsou ovšem velmi malé, řádově do 1 % napříč všemi jízdními cykly. Výsledky ukazují na to, že je vhodnější provést statickou optimalizaci z úplné charakteristiky spalovacího motoru, respektive celého soustrojí. Určité úspory dosažené použitím schodovité zatěžovací charakteristiky lze sledovat v případě velmi dynamických změn průběhu požadovaného výkonu. Tyto jevy však nelze předpokládat u hybridních pohonů, kde jsou rychlé změny požadavků na trakční výkon hrazeny z akumulátorů nebo superkapacitorů.

Univerzita Pardubice Dopravní fakulta Jana Pernera	Dizertační práce	140
---	------------------	-----

Hysterezní pásmo u schodovitých trajektorií je vhodné volit co nejmenší, ale s ohledem na minimalizaci počtu přechodů SM na jiné otáčky. Zvětšováním pásma hystereze nad její optimální velikost se pouze zvyšuje spotřeba paliva řádově o desetiny procenta.

Vliv omezení strmosti žádané hodnoty otáček, která vstupuje do regulátoru otáček SM, je pozitivní. S rostoucím omezením strmosti klesá produkce NO_x o několik málo desetin procenta, produkce PM až o několik procent. Spotřeba paliva zůstává téměř stejná. Strmost žádané hodnoty otáček je vhodné omezovat pouze v kladném směru, když žádaná hodnota roste. Pokud klesá, je lepší strmost neomezovat, neboť SM v tomto případě nespotřebovává palivo a nevytváří emise. V každém případě by měl nadřazený systém řízení hybridního pohonu jako celku žádat po SM pomalu se měnící žádanou hodnotu výkonu, aby byly omezeny přechodové stavy SM.

Neuvažování alternátoru (el. generátoru s pulzním usměrňovačem) připojeného k SM vede k průměrné chybě ve stanovení absolutních hodnot spotřeby paliva a produkce emisí o velikosti cca 8 % napříč použitými jízdními cykly. Vlivem nejednotkové účinnosti alternátoru dochází ke snížení účinnosti celého soustrojí a ke zvýšení spotřeby paliva a emisí o již zmiňovaných 8 %. Velikost této hodnoty se může v praxi měnit v závislosti na výkonu připojeného generátoru, bude vyšší u strojů s nižším výkonem vzhledem k jejich nižší účinnosti.

Optimalizace chodu celého soustrojí nepřináší žádné výrazné úspory spotřeby paliva vůči optimalizaci s uvažováním pouze samotného SM. Z toho lze usuzovat, že stačí optimalizovat chod samotného SM bez uvažování připojeného alternátoru. Tento vyslovený závěr je platný pouze v těch případech, když jsou si charakteristiky účinnosti SM a alternátoru tvarově podobné.

Detailní vyhodnocení výsledků provedených analýz lze nalézt u jednotlivých simulačních scénářů v kapitolách č. 5 a 6.

Přínosem práce je především detailní analýza chodu spalovacího motoru a celého soustrojí. Výsledky práce dávají představu o chování primárního zdroje i pro jiné jízdní cykly, respektive průběhy žádaného výkonu v čase než použité a o chování při různém nastavení otáčkové rampy. Další směr výzkumu by se měl zaměřit na optimalizaci provozu spalovacího motoru s ohledem na snížení produkce emisí (především složky NO_x a PM) pro splnění budoucích emisních limitů, ale současně se zachováním dostatečně nízké spotřeby paliva. Bude se jednat o dosažení kompromisu mezi co nejnižší spotřebou paliva a ještě únosnou produkcí emisí.

Některé výsledky této práce byly aplikovány na novém hybridním autobusu firmy Škoda Electric a.s. V této práci je však problematika prezentována pouze na úrovni obecné metodiky, neboť veškeré technické informace vztahující se k výše jmenovanému hybridnímu autobusu nejsou veřejné. Výsledky této práce vztahující se k optimalizaci řízení samotného spalovacího motoru jsou v současnosti využívány v souvislosti s vývojem systému řízení pohonu s hydrostatickým přenosem výkonu kolejového vozidla z produkce firmy CZ Loko a.s. Software tohoto řídicího systému je v současnosti vyvíjen na Katedře elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě na Dopravní fakultě Jana Pernera Univerzity Pardubice.

POUŽITÉ ZKRATKY

AC/DC	(Alternating Current / Direct Current) měnič střídavého napětí na stejnosměrné napětí
AFR	(Air to Fuel Ratio) poměr množství vzduchu ku množství paliva (bohatost směsi)
AKU	akumulátor
CO	(Carbon Monoxide) oxid uhelnatý
CVT	(Continuously Variable Transmission) převodovka se spojitě měnitelným převodovým poměrem
DC/DC	(Direct Current / Direct Current) měnič stejnosměrné napětí na jiné stejnosměrné napětí
DOE	(U.S. Department of Energy) Ministerstvo energetiky USA
DPF	(Diesel Particulate Filter) filtr pevných částic - způsob čištění výfukových plynů
EGR	(Exhaust Gas Recirkulation) systém recirkulace výfukových plynů
ELR	(European Load Response) standardizovaná procedura měření škodlivin výfukových plynů u motorů nákladních vozidel a autobusů
EPA	(US Environmental Protection Agency) Agentura pro ochranu životního prostředí
ESC	(European Stationary Cycle) standardizovaná procedura měření škodlivin výfukových plynů u motorů nákladních vozidel a autobusů
ETC	(European Transient Cycle) standardizovaná procedura měření škodlivin výfukových plynů u motorů nákladních vozidel a autobusů
HC	(Hydro Carbons) uhlovodíky
IGBT	(Insulated Gate Bipolar Transistor) druh tranzistorů určený pro velký rozsah spínacích výkonů při vysokých spínacích frekvencích
MVM	(Mean Value Model) typ modelu spalovacího motoru
NO _x	(Nitrogen Oxides) oxidy dusíku
NREL	(National Renewable Energy Laboratory) organizace pod správou ministerstva energetiky USA (DOE) pro výzkum a aplikaci obnovitelných zdrojů energie
NYCC	(New York City Cycle) jízdní cyklus pro osobní vozidla
PM	(Particulate Matter) pevné částice
PMSG	(Permanent Magnet Synchronous Generator) synchronní generátor s permanentními magnety
PMSM	(Permanent Magnet Synchronous Motor) synchronní motor s permanentními magnety
SCR	(Selective Catalytic Reduction) selektivní katalytická redukce – způsob čištění výfukových plynů
SM	spalovací motor
SORT	(Standardized On-Road Test) standardizovaný jízdní cyklus pro autobusy

Univerzita Pardubice Dopravní fakulta Jana Pernera	Dizertační práce	142
---	------------------	-----

VTG (Variable Turbine Geometry) turbodmychadlo s variabilní geometrií turbíny

ZNAČENÍ VELIČIN

AFR_s	stechiometrický poměr [kg/kg]
EI	emisní index (množství emisní složky v gramech na kilogram paliva) [g/kg]
f_n	jmenovitá frekvence el. generátoru [-]
F_{tr}	trakční síla [N]
H_u	dolní výhřevnost paliva [J/kg]
i_d	tokotvorná složka statorového proudu v ose d v transformované dvoufázové soustavě d-q [A]
i_q	momentotvorná složka statorového proudu v ose q v transformované dvoufázové soustavě d-q [A]
I	efektivní hodnota proudu fáze statoru [A]
I_n	jmenovitý proud fáze statoru el. generátoru [A]
I_{DC}	proud odebíraný ze stejnosměrného meziobvodu [A]
J_{GEN}	moment setrvačnosti el. generátoru [kgm ²]
J_c	celkový moment setrvačnosti spalovacího motoru s připojeným el. generátorem [kgm ²]
k_u	napěťová konstanta el. generátoru [V/1/min]
L	indukčnost fáze statoru el. generátoru [H]
L_d	podélná indukčnost statoru v transformované dvoufázové soustavě d-q v ose d [H]
L_q	příčná indukčnost statoru v transformované dvoufázové soustavě d-q v ose q [H]
m	hmotnost vozidla [kg]
m_{air}	množství vzduchu ve směsi paliva se vzduchem [kg]
m_f	množství paliva ve směsi paliva se vzduchem [kg]
m_{iman}	hmotnost plynu (čerstvý vzduch + recirkulované spaliny) v sání [kg]
$m_{iman,air}$	množství čerstvého vzduchu v sání [kg]
$m_{iman,egr}$	množství recirkulovaných spalin v sání [kg]
$\dot{m}_{air,in}$	průtok čerstvého vzduchu, kterým se plní sací potrubí [kg/s]

Univerzita Pardubice Dopravní fakulta Jana Pernera	Dizertační práce	144
---	------------------	-----

\dot{m}_c	průtok čerstvého vzduchu přes kompresor turbodmyhadla [kg/s]
\dot{m}_{egr}	průtok recirkulovaných spalin, kterými se plní sací potrubí [kg/s]
m_{eman}	množství spalin ve výfukovém potrubí [kg]
$\dot{m}_{eng,air,in}$	průtok čerstvého vzduchu do válců motoru [kg/s]
$\dot{m}_{eng,in}$	průtok plynu (čerstvý vzduch + recirkulované spaliny) do válců motoru [kg/s]
\dot{m}_{exh}	průtok spalin z výfukového potrubí [kg/s]
\dot{m}_f	průtok paliva do motoru [kg/s]
\dot{m}_t	průtok výfukových spalin turbínou [kg/s]
M	moment elektrického generátoru [Nm]
M_b	brzdny moment motorové brzdy [Nm]
M_e	efektivní moment na spalovacího motoru [Nm]
M_f	ztráty třením spalovacího motoru [Nm]
M_i	indikovaný moment spalovacího motoru [Nm]
M_n	jmenovitý moment el. generátoru [Nm]
M_p	ztráty výměnou náplně válců spalovacího motoru [Nm]
M_z	zatěžovací moment spalovacího motoru [Nm]
n	otáčky spalovacího motoru [1/min]
n_n	jmenovité otáčky el. generátoru [1/min]
p_{eman}	tlak ve výfukovém potrubí [Pa]
p_{iman}	tlak v sání [Pa]
p_i	střední indikovaný tlak [Pa]
p_{me0f}	střední efektivní tlak třecích ztrát spalovacího motoru [Pa]
p_p	počet pólových dvojic el. generátoru [-]
P_b	brzdny výkon motorové brzdy [W]
P_{DC}	výkon odebíraný ze stejnosměrného meziobvodu [W]

Univerzita Pardubice Dopravní fakulta Jana Pernera	Dizertační práce	145
---	------------------	-----

$P_{dostMax}$	dostupný efektivní výkon spalovacího motoru v motorovém režimu při daných otáčkách [W]
$P_{dostMin}$	dostupný efektivní výkon spalovacího motoru v brzděném režimu při daných otáčkách [W]
P_{dyn}	rezerva pro dynamický výkon spalovacího motoru při daných otáčkách [W]
P_e	efektivní výkon spalovacího motoru [W]
P_{el}	elektrický výkon el. generátoru [W]
P_f	ztráty třením spalovacího motoru [W]
P_i	indikovaný výkon spalovacího motoru [W]
P_{max}	maximální efektivní výkon spalovacího motoru při daných otáčkách [W]
P_{mech}	mechanický příkon el. generátoru [W]
$P_{mech,n}$	jmenovitý mechanický příkon el. generátoru [W]
P_p	ztráty výměnou náplně válců spalovacího motoru [W]
P_{rez}	rezerva maximálního efektivního výkonu spalovacího motoru při daných otáčkách [W]
P_{tr}	trakční výkon [W]
ΔP_{0n}	jmenovité ztráty naprázdno el. generátoru [W]
ΔP_{jn}	jmenovité Joulovy ztráty el. generátoru [W]
R	odpor fáze statoru el. generátoru [Ω]
S_n	jmenovitý zdánlivý výkon el. generátoru [VA]
T_{EGR}	teplota recirkulovaných spalín [K]
T_{iair}	teplota okolního vzduchu [K]
T_{iman}	teplota v sání [K]
u_d	složka statorového napětí v ose d v transformované dvoufázové soustavě d-q [V]
u_q	složka statorového napětí v ose q v transformované dvoufázové soustavě d-q [V]
U_n	jmenovité sdružené efektivní napětí statoru el. generátoru [V]
U_{DC}	napětí stejnosměrného meziobvodu [V]
v	rychlost vozidla [m/s]

Univerzita Pardubice Dopravní fakulta Jana Pernera	Dizertační práce	146
---	------------------	-----

V_{eman}	objem výfukového potrubí [m ³]
V_{iman}	objem sacího potrubí [m ³]
V_k	kompresní objem spalovacího motoru [litrů]
V_z	zdvihový objem spalovacího motoru [litrů]
W_i	indikovaná práce pracovního oběhu spalovacího motoru [J]
X_{egr}	poměr recirkulovaných spalin v celkovém množství plynu (čerstvý vzduch + recirkulované spaliny) v sání spalovacího motoru [-]
X_{corr}	korekční součinitel emisí spalovacího motoru [-]
ε	kompresní poměr spalovacího motoru [-]
η_c	celková účinnost spalovacího motoru [-]
η_i	indikovaná účinnost spalovacího motoru [-]
η_m	mechanická účinnost spalovacího motoru [-]
η_n	jmenovitá účinnost el. generátoru [-]
η_{BRIDGE}	účinnost pulzního usměřovače [-]
η_{PMSG}	účinnost el. generátoru při daných otáčkách a zatížení [-]
$\eta_{PMSG+BRIDGE}$	celková účinnost el. generátoru s pulzním usměřovačem [-]
λ	součinitel přebytku vzduchu [-]
λ_{dyn}	součinitel přebytku vzduchu v přechodovém stavu [-]
λ_{qs}	součinitel přebytku vzduchu ve statickém režimu [-]
φ	hodnota počátku vstříku paliva vznětového spalovacího motoru [° KH]
Ψ_d	spřažený statorový magnetický tok v ose d v transformované dvoufázové soustavě d-q [Wb]
Ψ_f	spřažený magnetický tok permanentních magnetů [Wb]
Ψ_q	spřažený statorový magnetický tok v ose q v transformované dvoufázové soustavě d-q [Wb]
ω_r	mechanická úhlová rychlost rotoru [rad/s]
ω	otáčky spalovacího motoru [rad/s]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 Struktura sériového hybridního pohonu.....	9
Obr. 2.1 Sériový hybridní pohon.....	12
Obr. 2.2 Paralelní hybridní pohon.....	13
Obr. 2.3 Ukázka On-Off strategie řízení SM	14
Obr. 2.4 Orion VII hybrid bus (2007)	16
Obr. 2.5 Uspořádání pohonu autobusu Orion VII.....	16
Obr. 2.6 Solaris Urbino 18 hybrid.....	17
Obr. 2.7 Rozmístění komponent v Urbino 18 hybrid.....	17
Obr. 2.8 Uspořádání pohonu autobusu Solaris Urbino 18 Vossloh Kiepe.....	17
Obr. 2.9 Mercedes-Benz Citaro G BlueTec Hybrid.....	18
Obr. 2.10 Volvo 7700 Hybrid	18
Obr. 2.11 Škoda H 12 – pohled 1.....	19
Obr. 2.12 Škoda H 12 – pohled 2.....	19
Obr. 2.13 Blokové schéma přeplňovaného vznětového motoru.....	20
Obr. 2.14 Produkce emisí HC, CO, NO _x a PM u vznětového motoru s přímým vstříkem paliva v závislosti na součiniteli přebytku vzduchu λ , zdroj [2].....	21
Obr. 2.15 Vývoj evropských limitů škodlivých emisí ve výfukových plynech pro vznětové motory nákladních vozidel a autobusů	22
Obr. 2.16 Naměřené a simulované emise CO a PM během jízdního cyklu ETC, vznětový motor plnicí emisní normu EURO 3, zdroj: [10].....	23
Obr. 2.17 Indikátorový diagram čtyřdobého pístového spalovacího motoru, zdroj [4].....	23
Obr. 2.18 Vnější otáčková charakteristika motoru.....	25
Obr. 2.19 Úplná charakteristika motoru.....	26
Obr. 2.20 Charakteristika účinnosti motoru	27
Obr. 2.21 Mapa měrné produkce PM.....	28
Obr. 2.22 Mapa měrné produkce NO _x	28
Obr. 2.23 Měřítka veličin v mean-value modelu, zdroj: [2] a) veličina s význačnou dynamikou – popis diferenciální rovnicí (např. tlak v sání) b) velmi rychlá veličina – popis algebraickou rovnicí (např. kroutící moment) c) velmi pomalá veličina – popis konstantou (např. teplota motoru)	29
Obr. 2.24 Blokové schéma a vazby mezi bloky modelu přeplňovaného vznětového motoru (EGR a mezichladič stlačeného vzduchu se zde neuvažují, nejsou zakresleny) zdroj: [2]	30
Obr. 2.25 Model pohonu v SW ADVISOR.....	32
Obr. 2.26 Klasická konstrukce PMSM.....	34

Univerzita Pardubice Dopravní fakulta Jana Pernera	Dizertační práce	148
---	------------------	-----

Obr. 2.27 Struktura zdrojové soustavy s PMSG a pulzním usměrňovačem	35
Obr. 2.28 Fázorový diagram synchronního stroje při momentové regulaci.....	36
Obr. 2.29 Fázorový diagram synchronního stroje při momentové regulaci při odbuzování.....	37
Obr. 2.30 Regulace momentu PMSG.....	38
Obr. 3.1 Úplná charakteristika spalovacího motoru.....	41
Obr. 3.2 Palivová mapa – spotřeba paliva v [g/s]	41
Obr. 3.3 Účinnost SM ve 2D.....	42
Obr. 3.4 Účinnost SM ve 3D.....	42
Obr. 3.5 Optimální trajektorie momentu v úplné charakteristice SM.....	42
Obr. 3.6 Optimální trajektorie momentu v charakteristice účinnosti SM	42
Obr. 3.7 Průběh optimálního výkonu v závislosti na otáčkách motoru.....	43
Obr. 3.8 Průběh optimálních otáček v závislosti na výkonu motoru.....	43
Obr. 3.9 Porovnání původní a schodovité optimální trajektorie	45
Obr. 3.10 Odpovídající průběh momentu schodovité optimální trajektorie v úplné charakteristice SM	45
Obr. 3.11 Schodovitá trajektorie s hysterezí 10 kW – průběh optimálního výkonu dle otáček.....	45
Obr. 3.12 Schodovitá trajektorie s hysterezí 10 kW – průběh optimálních otáček dle výkonu	45
Obr. 3.13 Princip optimalizace (postupně po intervalech).....	46
Obr. 3.14 Nalezení optimálních otáček a šířky intervalu výkonu v jednom z intervalů výkonu	46
Obr. 3.15 Blokové schéma přeplňovaného vznětového motoru.....	47
Obr. 3.16 Vytvořený model vznětového motoru.....	49
Obr. 3.17 Vnitřní struktura modelu SM	50
Obr. 3.18 Ukázka průběhu složky indikované účinnosti závislé na otáčkách spalovacího motoru zdroj: [2]	53
Obr. 3.19 Palivová mapa motoru	53
Obr. 3.20 Invertovaná palivová mapa motoru pro výpočet kroutícího momentu	53
Obr. 3.21 Blok výpočtu momentu a otáček motoru	54
Obr. 3.22 Vnitřní struktura bloku výpočtu momentu a otáček motoru	54
Obr. 3.23 Průběh ztrát třením v modelu SM	57
Obr. 3.24 Charakteristika motorové brzdy v modelu SM	58
Obr. 3.25 Celkový brzdový výkon SM	58
Obr. 3.26 Úplná charakteristika motoru se zakroužkovaným počátečním bodem.....	58
Obr. 3.27 Originální palivová mapa motoru s vyznačeným počátečním bodem	58

Univerzita Pardubice Dopravní fakulta Jana Pernera	Dizertační práce	149
---	------------------	-----

Obr. 3.28 Palivová mapa extrapolovaná ve směru momentu (černou čárkovanou čarou je naznačen průběh třecího momentu při nulové dávce paliva).....	59
Obr. 3.29 Výsledná extrapolovaná palivová mapa (ve směru momentu i otáček).....	59
Obr. 3.30 Blok výpočtu produkce emisí a spotřeby paliva	60
Obr. 3.31 Vnitřní struktura bloku produkce emisí a spotřeby paliva	61
Obr. 3.32 Mapa produkce NO _x [g/s]	62
Obr. 3.33 Mapa produkce PM [g/s].....	62
Obr. 3.34 3D graf měrné produkce NO _x [g/kWh]	62
Obr. 3.35 3D graf měrné produkce PM [g/kWh]	62
Obr. 3.36 Model optimalizační jednotky řízení vznětového spalovacího motoru.....	65
Obr. 3.37 Vnitřní struktura modelu <i>Diesel Control</i>	66
Obr. 3.38 Vnitřní struktura subsystému <i>Optimal Speed and Torque</i>	67
Obr. 3.39 Výkonová rezerva pro urychlení SM do vyšších otáček.....	68
Obr. 3.40 Dostupný výkon SM	69
Obr. 3.41 Průběh rezervy dynamického výkonu v závislosti na otáčkách a otáčkové rampě (strmost otáčkové rampy 500 1/min/s).....	71
Obr. 3.42 Průběh dostupného výkonu v závislosti na otáčkách a otáčkové rampě (strmost otáčkové rampy 500 1/min/s)	71
Obr. 3.43 Simulační model regulace stejnosměrného napětí U _{DC}	73
Obr. 3.44 Model PMSG	74
Obr. 3.45 Model pulzního usměrňovače	75
Obr. 3.46 Model regulátoru pulzního usměrňovače.....	75
Obr. 3.47 Regulátor napětí	75
Obr. 3.48 Model vektorové regulace PMSG.....	76
Obr. 3.49 Model stejnosměrného meziobvodu	76
Obr. 3.50 Účinnost PMSG v závislosti na momentu a otáčkách.....	78
Obr. 3.51 Moment PMSG v závislosti na el. výkonu a otáčkách.....	78
Obr. 3.52 Zjednodušený model alternátoru.....	78
Obr. 3.53 Vnitřní struktura zjednodušeného modelu alternátoru	78
Obr. 3.54 Optimální trajektorie momentu soustrojí v charakteristice účinnosti soustrojí.....	79
Obr. 3.55 Optimální trajektorie momentu soustrojí v charakteristice účinnosti SM.....	79
Obr. 3.56 Porovnání účinnosti samotného SM a celého soustrojí.....	79
Obr. 3.57 Průběh optimálních otáček soustrojí (zeleně) v závislosti na výkonu SM.....	79

Univerzita Pardubice Dopravní fakulta Jana Pernera	Dizertační práce	150
---	------------------	-----

Obr. 4.1 Jízdní cyklus SORT 1	86
Obr. 4.2 Histogram výkonů v jízdním cyklu SORT 1.....	86
Obr. 4.3 Jízdní cyklus SORT 2	86
Obr. 4.4 Histogram výkonů v jízdním cyklu SORT 2.....	86
Obr. 4.5 Jízdní cyklus SORT 3	87
Obr. 4.6 Histogram výkonů v jízdním cyklu SORT 3.....	87
Obr. 4.7 Jízdní cyklus NYCC.....	87
Obr. 4.8 Histogram výkonů v jízdním cyklu NYCC.....	87
Obr. 5.1 Blokové schéma simulačního modelu.....	89
Obr. 5.2 Momentová charakteristika startéru AZF45 (přepočtená na hřídel SM, převodový poměr 10:1)	91
Obr. 5.3 Toleranční pásmo pro vyhodnocení četnosti optimálních pracovních bodů SM	94
Obr. 5.4 Spotřeba paliva v jízdním cyklu SORT 2 dle použité trajektorie.....	94
Obr. 5.5 Zvýšení spotřeby paliva vůči spojitě optimální trajektorii č. 1 v jízdním cyklu SORT 2 dle použité schodovité trajektorie	94
Obr. 5.6 Spojitá a výchozí schodovitá trajektorie č. 2.....	95
Obr. 5.7 Optimalizovaná schodovitá trajektorie č. 3.....	95
Obr. 5.8 Optimalizovaná schodovitá trajektorie č. 4.....	95
Obr. 5.9 Pracovní body momentu v jízdním cyklu (spojitá trajektorie č. 1).....	96
Obr. 5.10 Pracovní body momentu v jízdním cyklu (schodovitá trajektorie č. 4)	96
Obr. 5.11 Produkce NO _x v jízdním cyklu SORT 2 dle použité trajektorie	96
Obr. 5.12 Produkce PM v jízdním cyklu SORT 2 dle použité trajektorie.....	96
Obr. 5.13 Různé průběhy optimálních trajektorií dle typu optimalizované veličiny	97
Obr. 5.14 Optimální trajektorie pro minimalizaci produkce PM	97
Obr. 5.15 Optimální trajektorie pro minimalizaci produkce NO _x	97
Obr. 5.16 Optimální měrná spotřeba paliva a jí odpovídající měrná produkce PM a NO _x v závislosti na výkonu spalovacího motoru	98
Obr. 5.17 Pracovní body výkonu v jízdním cyklu (spojitá trajektorie č. 1).....	99
Obr. 5.18 Pracovní body momentu v jízdním cyklu (spojitá trajektorie č. 1).....	99
Obr. 5.19 Četnost pracovních bodů výkonu v jízdním cyklu (spojitá trajektorie č. 1)	99
Obr. 5.20 Optimální pracovní body výkonu v jízdním cyklu včetně jejich četnosti (spojitá trajektorie č. 1)	99
Obr. 5.21 Průběh momentů, výkonů a otáček během jízdního cyklu SORT 2 (spojitá trajektorie č. 1)	100

Univerzita Pardubice Dopravní fakulta Jana Pernera	Dizertační práce	151
---	------------------	-----

Obr. 5.22 Průběh momentů, výkonů a otáček během jízdního cyklu SORT 2 DETAIL 100. až 140. sekundy (spojitá trajektorie č. 1).....	101
Obr. 5.23 Pracovní body výkonu v jízdním cyklu (schodovitá trajektorie č. 4)	102
Obr. 5.24 Pracovní body momentu v jízdním cyklu (schodovitá trajektorie č. 4)	102
Obr. 5.25 Četnost pracovních bodů výkonu v jízdním cyklu (schodovitá trajektorie č. 4).....	102
Obr. 5.26 Optimální pracovní body výkonu v jízdním cyklu včetně jejich četnosti (schodovitá trajektorie č. 4)	102
Obr. 5.27 Průběh momentů, výkonů a otáček během jízdního cyklu SORT 2 (schodovitá trajektorie č. 4)	103
Obr. 5.28 Průběh momentů, výkonů a otáček během jízdního cyklu SORT 2 DETAIL 100. až 140. sekundy (schodovitá trajektorie č. 4)	104
Obr. 5.29 Vliv optimalizace trajektorie na konkrétní jízdní cyklus	109
Obr. 5.30 Procentuální rozdíly ve spotřebě paliva mezi trajektoriami.....	109
Obr. 5.31 Měrná spotřeba paliva [g/kWh] v závislosti na výkonu SM (platí pro optimální spojitou trajektorii č. 1).....	110
Obr. 5.32 Produkce emisí NO _x v závislosti na jízdním cyklu	112
Obr. 5.33 Produkce emisí PM v závislosti na jízdním cyklu	112
Obr. 5.34 Procentuální změna v produkci emisí NO _x v závislosti na jízdním cyklu	112
Obr. 5.35 Procentuální změna v produkci emisí PM v závislosti na jízdním cyklu.....	112
Obr. 5.36 Průběh výkonu a otáček SM (hystereze 10 kW).....	114
Obr. 5.37 Pracovní body SM (hystereze 10 kW)	114
Obr. 5.38 Průběh výkonu a otáček SM (hystereze 9 kW).....	115
Obr. 5.39 Pracovní body SM (hystereze 9 kW)	115
Obr. 5.40 Vliv hystereze na spotřebu paliva (jízdní cyklus SORT 1, různé trajektorie).....	116
Obr. 5.41 Vliv hystereze na spotřebu paliva (jízdní cyklus SORT 2, různé trajektorie).....	116
Obr. 5.42 Vliv hystereze na spotřebu paliva (jízdní cyklus SORT 3, různé trajektorie).....	116
Obr. 5.43 Omezení strmosti žádané hodnoty otáček (blok <i>Rate Limiter</i>)	118
Obr. 5.44 Vliv omezení strmosti žádané hodnoty otáček na spotřebu paliva (spojitá trajektorie č. 1). ..	119
Obr. 5.45 Vliv omezení strmosti žádané hodnoty otáček na produkci NO _x (spojitá trajektorie č. 1) ...	119
Obr. 5.46 Vliv omezení strmosti žádané hodnoty otáček na produkci PM (spojitá trajektorie č. 1).....	119
Obr. 5.47 Vliv omezení strmosti žádané hodnoty otáček na spotřebu paliva (schodovitá trajektorie č. 4)	120
Obr. 5.48 Vliv omezení strmosti žádané hodnoty otáček na produkci NO _x (schodovitá trajektorie č. 4)	120

Univerzita Pardubice Dopravní fakulta Jana Pernera	Dizertační práce	152
---	------------------	-----

Obr. 5.49 Vliv omezení strmosti žádané hodnoty otáček na produkci PM (schodovitá trajektorie č. 4)	120
Obr. 5.50 Úspory dosažené vypínáním SM v zastávkách	122
Obr. 5.51 Provoz SM v režimu Stop and Go (sytě – vypínání SM v zastávkách, bledě – běžný provoz)	123
Obr. 6.1 Blokové schéma simulačního modelu celého soustrojí	125
Obr. 6.2 Pracovní body výkonu v jízdním cyklu (spojitá trajektorie č. 1g)	132
Obr. 6.3 Pracovní body momentu v jízdním cyklu (spojitá trajektorie č. 1g)	132
Obr. 6.4 Četnost pracovních bodů výkonu v jízdním cyklu (spojitá trajektorie č. 1g)	132
Obr. 6.5 Optimální pracovní body výkonu v jízdním cyklu včetně jejich četnosti (spojitá trajektorie č. 1g)	132
Obr. 6.6 Průběh momentů, výkonů a otáček během jízdního cyklu SORT 2 (spojitá trajektorie č. 1g celého soustrojí)	133
Obr. 6.7 Průběh momentů, výkonů a otáček během jízdního cyklu SORT 2 DETAIL 100. až 140. sekundy (spojitá trajektorie č. 1g celého soustrojí)	134
Obr. 6.8 Detail průběhu všech výkonů v simulaci (spojitá trajektorie č. 1g celého soustrojí)	135
Obr. 6.9 Průběhy produkce emisí a spotřeby paliva během jízdního cyklu SORT 2 (spojitá trajektorie č. 1g celého soustrojí)	136
Obr. 6.10 Průběhy vybraných veličin spalovacího motoru během jízdního cyklu SORT 2 (spojitá trajektorie č. 1g celého soustrojí)	137

SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1 Parametry autobusu Orion VII (2007)	16
Tab. 3.1 Schodovitá trajektorie	44
Tab. 3.2 Parametry použitého spalovacího motoru	48
Tab. 3.3 Počáteční zrychlení SM při konstantní rezervě výkonu $P_{dyn} = 10 \text{ kW}$	70
Tab. 3.4 Parametry PMSG	74
Tab. 4.1 Parametry vozidla použité v jízdních cyklech SORT a NYCC	81
Tab. 4.2 Parametry jízdních cyklů	83
Tab. 4.3 Výkonové parametry jízdních cyklů	83
Tab. 5.1 Scénář č. 1 – spotřeba paliva, jízdní cyklus SORT 2	93
Tab. 5.2 Scénář č. 1 - produkce emisí a další ukazatele, jízdní cyklus SORT 2	93
Tab. 5.3 Evropské emisní limity pro vznětové motory nákladních vozidel a autobusů	98
Tab. 5.4 Scénář č. 2 - Seznam všech použitých trajektorií ve scénáři č. 2	106
Tab. 5.5 Scénář č. 2 - Celková spotřeba paliva [g] - vliv optimalizace na konkrétní jízdní cyklus	108
Tab. 5.6 Scénář č. 2 - Spotřeba paliva [l/100km] - vliv optimalizace na konkrétní jízdní cyklus	108
Tab. 5.7 Scénář č. 2 - Procentuální rozdíly mezi trajektoriemi - vliv optimalizace na konkrétní jízdní cyklus	109
Tab. 5.8 Scénář č. 2 - Vliv jízdních cyklů na produkci emisí NO_x	111
Tab. 5.9 Scénář č. 2 - Vliv jízdních cyklů na produkci emisí PM	111
Tab. 5.10 Scénář č. 3 - Demonstrace účelnosti zavedení hystereze	114
Tab. 5.11 Scénář č. 3 - Demonstrace účelnosti zavedení hystereze - změny sledovaných parametrů ..	115
Tab. 5.12 Scénář č. 3 - Vliv velikosti hystereze u schodovité trajektorie č. 4 a jízdního cyklu SORT 2	116
Tab. 6.1 Trajektorie použité v simulačním scénáři č. 6	127
Tab. 6.2 Scénář č. 6 - celková spotřeba paliva [g] – rozdíly vůči chodu samotného SM	128
Tab. 6.3 Scénář č. 6 - celková spotřeba paliva [l/100km] – rozdíly vůči chodu samotného SM	129
Tab. 6.4 Scénář č. 6 – spotřeba paliva a další ukazatele, jízdní cyklus SORT 2	129
Tab. 6.5 Scénář č. 6 - celková produkce NO_x [g] – rozdíly vůči chodu samotného SM	130
Tab. 6.6 Scénář č. 6 - celková produkce PM [g] – rozdíly vůči chodu samotného SM	130
Tab. 6.7 Scénář č. 6 – produkce emisí, jízdní cyklus SORT 2	131

Univerzita Pardubice Dopravní fakulta Jana Pernera	Dizertační práce	154
---	------------------	-----

LITERATURA

- [1] BOSCH Robert GmbH. *Bosch automotive handbook*. 7th edition. Bentley Publishers, 2005. ISBN 978-0-8376-1540-0.
- [2] GUZZELLA, Lino, ONDER, Christopher. *Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engine Systems*. Germany : Springer Verlag, 2004. 300 s. ISBN 978-3-540-22274-3.
- [3] HEYWOOD, John, B. *Internal combustion engines fundamentals*. England : McGraw-Hill, 1988. 930 s. ISBN 0-07-028637-X.
- [4] BEROUN, Stanislav. *Vozidlové motory*. Technická univerzita v Liberci, fakulta strojní, studijní texty k předmětu „Motorová vozidla“. Liberec.
- [5] HENDRICKS, E. A Compact , Comprehensive Model of Large Turbocharged, Two-Stroke Diesel Engines. SAE Technical Paper No.900616, 1986.
- [6] MOSKWA, John., J. *Automotive engine modelling for real time control*. Massachusetts Institute of Technology. 1988.
- [7] KIENCKE, U., NIELSEN, L. *Automotive Control Systems: For Engine, Driveline, and Vehicle*. Springer Verlag, Germany, 2005. ISBN 3-540-23139-0.
- [8] RAJAMANI, Rajes. *Vehicle dynamics and control*. USA: Springer Verlag, 2006. 470s. ISBN 0-387-26396-9.
- [9] REXEIS, M., et al. *Heavy duty vehicle emissions*. ARTEMIS WP 400 Final Report. 2005.
- [10] ERICSON, C., WESTERBERG B., EGNELL, R. Transient Emission Predictions With Quasi Stationary Models. SAE Technical Paper No. 2005-01-3852, 2005.
- [11] FILIPI, Z., FATHY, H., HAGENA, J. Engine-in-the-Loop Testing for Evaluationg Hybrid Propulsion Concepts and Transient Emissions – HMMWV Case Study. SAE Technical Paper No.2006-01-0443, 2005.
- [12] FONS, M., MULLER, M., CHEVALIER, A., HENDRICKS, E., SORENSON, S. Mean Value Engine Modelling of an SI Engine with EGR. SAE Technical Paper No. 1999-01-0909, 1999.
- [13] GUZZELLA, L., AMSTUTZ, A. Control of Diesel Engines. IEEE Control Systems Magazine, Vol. 18, Issue 5, Page(s):53 - 71, 1998.
- [14] JENSEN, J. P., KRISTENSEN, A. F., SORENSON, S.C., HOUBAK, N. Mean Value Modeling of a Small Turbocharged Diesel Engine. SAE Technical Paper No. 910070, 1991.
- [15] KATRAŠNIK, T. Analysis of Fuel Consumption Reduction Due to Powertrain Hybridization and Downsizing of ICE. SAE Technical Paper No. 2006-01-3262, 2006.

Univerzita Pardubice Dopravní fakulta Jana Pernera	Dizertační práce	155
---	------------------	-----

- [16] KATRAŠNIK, T., TRENC, F., OPREŠNIK, S. R. Analysis of Energy Conversion Efficiency in Paralell and Series Hybrid Powertrains. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 56, No. 6, 2007.
- [17] MORAAL, P., KOLMANOVSKY, I. Turbocharger Modeling for Automotive Control Applications. SAE Technical Paper No. 1999-01-0908, 1999.
- [18] STRANDH, P. *Combustion Engine Models for Hybrid Vehicle*. Lund University, Sweden, 2002. 80 s. Licentiate thesis. ISSN 0282-1990.
- [19] ANDERSSON, Ch. *Observations On Electric Hybrid Bus Design*. Lund University, Sweden, 2001. 111 s. Diplomová práce. Licentiate thesis. ISBN 91-88934-18-7.
- [20] JONASSON, K. *Control of Hybrid Electric Vehicles with Diesel Engines*. Lund University, Sweden, 2005. 136 s. Doktorská práce. ISBN 91-88934-38-1.
- [21] KARLSSON, F. *Modeling the Intake Manifold Dynamics in a Diesel Engine*. Linköping University, Sweden, 2001. 74 s. LITH-ISY-EX-3084.
- [22] ERICSON, C. *Mean value modelling of a poppet valve EGR-system*. Linköping University, Sweden, 2004. 43 s. Diplomová práce. LiTH-ISY-EX-3543-2004.
- [23] MATĚJOVSKÝ, V. *Automobilová paliva*. GRADA Publishing, 2005. 224 s. ISBN 80-247-0350-5.
- [24] PAULUS, T. *Zavedení a integrace autobusů s hybridním pohonem v České republice*. Univerzita Pardubice, DFJP, 2006. 62 s. Diplomová práce.
- [25] SVOBODA, L. *Vozidla s pohonem CNG a jejich emise škodlivin*. Univerzita Pardubice, DFJP, 2008. 50 s. Bakalářská práce.
- [26] CICCARELI, T., TOOSI, R. *Assessment of Hybrid Configuration and Control Strategies in Planning Future Metropolitan/Urban Transit Systems*. Final report. 2002.
- [27] RAHMAN, Z., BUTLER, K.L., EHSANI, M. Design studies of a series hybrid heavy-duty transit bus using V-ELPH 2.01. Vehicular Technology Conference, 1999 IEEE 49th, On page(s): 2268-2272 vol.3, 1999. ISBN 0-7803-5565-2.
- [28] ERICSON, C., WESTERBERG B., EGNELL, R. Advisor 2.1: A User Friendly Advanced Powertrain Simulation Using a Combined Backward-Forward A. IEEE transactions on vehicular technology, vol. 48, No. 6, November 1999.
- [29] BARSALI, S., MIULLI, C., POSSENTI, A. A Control Strategy to Minimize Fuel Consumption of Series Hybrid electric Vehicles. IEEE transactions on energy conversion, vol. 19, No. 1, March 2004.

Univerzita Pardubice Dopravní fakulta Jana Pernera	Dizertační práce	156
---	------------------	-----

- [30] HOCHGRAF, C. G., RYAN, M. J., WIEGMAN, H. L. Engine Control Strategy for a Series Hybrid Electric Vehicle Incorporating Load-Leveling and Computer Controlled Energy Management. SAE Technical Paper No. 960230, 1996.
- [31] CAO, G., HE, B., et.al. Systematic Fuel Reduction Strategies of Series Hybrid Transit Bus. 16th IEEE International Conference on Control Applications, Singapore, 1-3 October 2007.
- [32] JALIL, N., KHEIR, N., SALMAN, M. A rule-based energy management strategy for a series hybrid vehicles. Proceedings of the American Control Conference, Albuquerque, New Mexico June 1997, pp. 689-693.
- [33] PRITCHARD, E., JOHNSON, R. Hybrid Electric School Bus Technical Feasibility. SAE Technical Paper No. 2005-01-3615, 2005.
- [34] TRIGER, L., PATERSON, J., DROZDZ, P. Hybrid Vehicle Engine Size Optimization. SAE Technical Paper No. 931793, 1993.
- [35] BADIN, F., JEANNERET, B., et al. Evaluation of a true low floor 12m series hybrid bus. The 16th International Electric Vehicle Symposium, Beijing China, October 13 – 16, 1999.
- [36] CZECHBUS: První prezentace sériového hybridu Škoda H 12 v karosérii Solaris. *BUSportál [online]*. 3.11.2011 [cit. 2011-12-28]. Dostupné z: <http://www.busportal.cz/modules.php?name=article&sid=9313>
- [37] Solaris. *Solaris Bus & Coach [online]*. [cit. 2011-1-2]. Dostupné z: <http://www.solarisbus.pl/en/hybrid.html>
- [38] Ekologie v provozu: Mercedes-Benz Citaro G BlueTec Hybrid. *Autobusové noviny [online]*. 22.7.2009 [cit. 2012-01-02]. Dostupné z: <http://www.autobusovenoviny.cz/clanek/1319/ekologie-v-provozu-mercedes-benz-citaro-g-bluetec-hybrid>
- [39] USA Emission Standards, Heavy-Duty Truck and Bus Engines. *DieselNet: Diesel Emissions Online [online]*. 2011-02-01 [cit. 2011-09-06]. Dostupné z: www.dieselnets.com.
- [40] Startéry. *AGV [online]*. 2009-08-13 [cit. 2011-09-10]. Dostupné z: <http://www.iskra-agv.cz/startery.htm>
- [41] Příručka k jízdám SORT. „Brochure SORT_EN.pdf“.
- [42] NYLUND, N, ERKKILÄ, K, et al. *Evaluation of duty cycles for heavy-duty urban vehicles*. Final report of IEA AMF Annex XXIX. VTT Research Notes 2396. Espoo. 2007.
- [43] NYLUND, N, ERKKILÄ, K, et al. *Fuel consumption and exhaust emissions of urban buses: Performance of the new diesel technology*. VTT Research Notes 2373. Espoo. 2007.
- [44] Center of Alternative Fuels, Engines, and Emission (CAFEE). *Transportable Heavy Duty Emissions Testing Laboratory and Research Program*. Final Report. Department of Mechanical & Aerospace Engineering, West Virginia University. 2008.

Univerzita Pardubice Dopravní fakulta Jana Pernera	Dizertační práce	157
---	------------------	-----

- [45] Center of Alternative Fuels, Engines, and Emission (CAFEE). *Modeling Heavy-duty Vehicle Fuel Economy Based on Cycle Properties*. Final Report. Department of Mechanical & Aerospace Engineering, West Virginia University. 2009.
- [46] EHSANI, M., GAO, Y., GAY, S. E., EMADI, A. *Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicle: Fundamentals, Theory and Design*. CRC Press, 2005. ISBN 0-8493-3154-4.
- [47] National Renewable Energy Laboratory. *National Renewable Energy Laboratory [online]*. 2011-30-12 [cit. 2.1.2012]. Dostupné z: <http://www.nrel.gov/>
- [48] Information Bridge. *DOE Scientific and Technical Information [online]*. 2011-13-12 [cit. 2.1.2012]. Dostupné z: <http://www.osti.gov/bridge/>
- [49] New York City Transit and the Environment. *MTA [online]*. 2011 [cit. 2.1.2012]. Dostupné z: <http://www.mta.info/nyct/facts/ffenvironment.htm>
- [50] New York City Leads World in Hybrid Bus Adoption. *IEEE Spectrum [online]*. 2010-14-4 [cit. 2.1.2012]. Dostupné z: <http://spectrum.ieee.org/energywise/green-tech/mass-transit/new-york-city-leads-world-in-hybrid-bus-adoption>
- [51] Orion VII Hybrid Bus. *Hybrid vehicles [online]*. [cit. 2012-01-03]. Dostupné z: <http://www.hybrid-vehicles.net/orion-vii-hybrid-bus.htm>
- [52] Hybridrive series components. *BAE systems [online]*. [cit. 2012-01-03]. Dostupné z: <http://www.hybridrive.com/lithium-ion-energy-storage-system.asp>
- [53] V New Yorku jezdí 1675 hybridních autobusů Daimler. *Hybrid.cz [online]*. [cit. 2012-01-03]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/novinky/v-new-yorku-jezdi-1675-hybridnich-autobusu-daimler>
- [54] CHANDLER, K., WALKOWICZ, K. *King County Metro Transit Hybrid Articulated Buses: Final Evaluation Results*. Technical Report NREL/TP-540-40585, 2006.
- [55] PAVELKA, J., ČEŘOVSKÝ, Z., JAVŮREK, J. *Elektrické pohony*. Praha, Vydavatelství ČVUT, 1996, 221 s, ISBN 80-01-01411-8.
- [56] JAVŮREK, J. *Regulace moderních elektrických pohonů*, Grada Publishing, Praha, 2003, 264 s, ISBN 80-247-0507-9.
- [57] ŠIMÁNEK, J., NOVÁK, J., ČERNÝ, O. Výzkum regulačních struktur pro trakční synchronní motor s permanentními magnety, In XXX. konference Elektrické pohony, Plzeň, 2007, ISBN 978-80-02-01921-3.
- [58] NOVÁK, J. Uplatnění synchronních strojů v dopravní technice – 1. část, Časopis ELEKTRO, roč. 2006, č. 6, s. 4-7, Praha 2006. ISSN 1210-0889.
- [59] NOVÁK, J. Uplatnění synchronních strojů v dopravní technice – 2. část, Časopis ELEKTRO, roč. 2006, č. 7, s. 8-11, Praha 2006. ISSN 1210-0889.

Univerzita Pardubice Dopravní fakulta Jana Pernera	Dizertační práce	158
---	------------------	-----

- [60] NOVÁK, J. Uplatnění synchronních strojů v dopravní technice – 3. část, Časopis ELEKTRO, roč. 2006, č. 8, s. 76-78, Praha 2006. ISSN 1210-0889.
- [61] ČERNÝ, O. *Výzkum perspektivních metod mikroprocesorového řízení pro trakční synchronní motor s permanentními magnety*. Univerzita Pardubice, 2009. 95 s. Dizertační práce.
- [62] ŠIMÁNEK, J. *Řešení napáječe a regulační struktury pro synchronní trakční motor s permanentními magnety*. Univerzita Pardubice, 2010. 108 s. Dizertační práce.

Univerzita Pardubice Dopravní fakulta Jana Pernera	Dizertační práce	159
---	------------------	-----

SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA

- [1] MAŠEK, Zdeněk. An Experimental Workplace for Combustion Process Optimization of Spark-ignition Engine. In: *EDPE 2007: 16-th international conference on Electrical Drivers and Power Electronics*. Vysoké Tatry, 24. - 26.9.2007. ISBN 978-80-8073-868-6.
- [2] MAŠEK, Zdeněk, ČERNÝ, Ondřej, DOLEČEK, Radovan, GREGORA, Stanislav, ŠIMÁNEK, Jiří. Vřivá brzda se zvýšenou dynamikou. In: *XXIX. Celostátní konference o elektrických pohonech*. Plzeň, 14. -16. června 2005. ISBN 80-02-01733-1.
- [3] MAŠEK, Zdeněk, ČERNÝ, Ondřej, DOLEČEK, Radovan, ŠIMÁNEK, Jiří. Zatěžovací dynamometr pro spalovací motory. In: *EPVE: Elektrické pohony a výkonová elektronika*. Brno, 8.-9.11.2005. ISBN 80-214-3052-4.
- [4] MAŠEK, Zdeněk, GREGORA, Stanislav. Stanoviště pro měření výkonových charakteristik spalovacích motorů. In: *The Fourth International Scientific Conference "Challenges in Transport and Communication"*. Pardubice, 14. – 15. září 2006. Díl III s. 1339-1344. ISBN 80-7194-880-2.
- [5] MAŠEK, Zdeněk, GREGORA, Stanislav. Mikroprocesorové řízení nízkotlakého bodového vstříkovaní. In: *The Fourth International Scientific Conference "Challenges in Transport and Communication"*. Pardubice, 14. – 15. září 2006. Díl III s. 1345-1350. ISBN 80-7194-880-2.
- [6] MAŠEK, Zdeněk, GREGORA, Stanislav. Experimentální pracoviště pro výzkum řízení spalovacího motoru. In: *Horse-drawn Railway to High-speed Transportation Systems: Od koněspřežné železnice k vysokorychlostním dopravním systémům*. Praha, 17. – 19.5. 2007. s. 161-164. ISBN 978-80-01-03699-0.
- [7] MAŠEK, Zdeněk, SEDLÁČEK, Tomáš. Výukový panel systému řízení zážehového motorů. In: *Elektrotechnická zařízení v dopravě*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2010. s. 1-11. ISBN 978-80-7395-237-2.
- [8] MAŠEK, Zdeněk, GREGORA, Stanislav. Přenosové systémy s vyšší účinností využívání energetického obsahu paliva. In: *Elektrotechnická zařízení v dopravě*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2010. s. 1-9. ISBN 978-80-7395-237-2.
- [9] MAŠEK, Zdeněk. Model vznětového spalovacího motoru pro pohon hybridního autobusu. In: *Elektrotechnická zařízení v dopravě*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2011. ISBN 978-80-7395-366-9.
- [10] MAŠEK, Zdeněk, GREGORA, Stanislav. Měření energie výboje induktivních a kapacitních zapalovacích systémů. In: *XXXI. konference Elektrické pohony*. Plzeň, 16. – 18.6.2009. ISBN 978-80-02-02151-3.
- [11] MAŠEK, Zdeněk. Měření parametrů kapacitních zapalování. In: *Elektrotechnická zařízení v dopravě*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2009. ISBN 978-80-7395-194-8.

Univerzita Pardubice Dopravní fakulta Jana Pernera	Dizertační práce	160
---	------------------	-----

- [12] MAŠEK, Zdeněk, GREGORA, Stanislav. Dvořák, Karel. Alternativní zdroje energie v ekologické dopravě. In: *International Conference Held on the Occasion of the 15th Anniversary of the Foundation of the Faculty: The Present and Future of Modern Transport..* Praha, 12. – 13.5. 2008.
- [13] MAŠEK, Zdeněk, GREGORA, Stanislav. Superkapacitory v dopravní technice. *Vědeckotechnický sborník ČD*. 2008(18), 95-104. ISSN: 1214-9047.
- [14] MAŠEK, Zdeněk, GREGORA, Stanislav. *Koncepce matematického modelu spalovacího motoru pro hybridní pohon autobusu*. Výzkumná zpráva pro ZČU Plzeň, Pardubice, 2009, 31 s.
- [15] MAŠEK, Zdeněk, GREGORA, Stanislav. *Studie volby a provozu primárního zdroje pro hybridní pohon autobusu*. Výzkumná zpráva pro ZČU Plzeň, Pardubice, 2009, 28 s.
- [16] MAŠEK, Zdeněk, GREGORA, Stanislav. *Implementace matematického modelu spalovacího motoru pro hybridní pohon autobusu*. Výzkumná zpráva pro ZČU Plzeň, Pardubice, 2010, 81 s.
- [17] NOVÁK, Jaroslav, MAŠEK, Zdeněk, ČERNÝ, Ondřej. *Úvodní studie pro řešení problematiky programového vybavení pro řídicí systém dieselelektrické lokomotivy*. Technická zpráva pro CZ Loko a.s., Pardubice, 2010, 46 s.
- [18] MAŠEK, Zdeněk, NOVÁK, Jaroslav. *Algoritmus řízení vznětového motoru jako primárního zdroje hybridního autobusu(2. okruh)(revize č.2)*. Výzkumná zpráva pro ZČU Plzeň, Pardubice, 2011, 99 s.
- [19] MAŠEK, Zdeněk, NOVÁK, Jaroslav. *Algoritmus řízení vznětového motoru jako primárního zdroje hybridního autobusu – příručka pro implementaci (revize č.2)*. Výzkumná zpráva pro ZČU Plzeň, Pardubice, 2011, 31 s.