



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

VYUŽITÍ MODELU REKUPERACE KINETICKÉ ENERGIE VOZIDEL

USE OF MODELS OF VEHICLE'S KINETIC ENERGY RECOVERY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MICHAL GALDA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. RNDr. Ing. JOSEF NEVRLÝ, CSc.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Michal Galda

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Využití modelu rekuperace kinetické energie vozidel

v anglickém jazyce:

Use of models of vehicle's kinetic energy recovery

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem bakalářské práce je analýza současného stavu poznání v oblasti tvorby matematicko-fyzikálních modelů rekuperace energie užitkových vozidel, užitím podkladů poskytnutých vedoucím BP; dotyčnou rekuperací je míněna úspora a zpětné využití energie, která je neúčelně „mařena“ v teplo v brzdách běžného vozidla, nevybaveného rekuperací.

Cíle bakalářské práce:

Bakalářská práce musí obsahovat:

- 1.Úvod
- 2.Definici základních pojmů
- 3.Přehled a rozbor existující literatury v dané oblasti
- 4.Analýzu a zhodnocení získaných poznatků
- 5.Vymezení trendů budoucího vývoje
- 6.Souhrnnou bibliografii
- 7.Závěr

Forma bakalářské práce: průvodní zpráva

Typ práce: rešeršní

Účel práce:pro potřeby průmyslu

Seznam odborné literatury:

- Matheson P., Stecki J.: Development and Simulation of a Hydraulic-Hybrid Powertrain for Use in Commercial Heavy Vehicles.P. 25-34, SAE International 2003.
- Nevrlý J.: Methodology of modeling fluid power and lubrication systems. ISBN 83-7085-848-1.Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2005.

Vedoucí bakalářské práce: prof. RNDr. Ing. Josef Nevrlý, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 25.11.2010

L.S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

GALDA, M. *Využití modelu rekuperace kinetické energie vozidel*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 50 s. Vedoucí bakalářské práce prof. RNDr. Ing. Josef Nevrlý, CSc..

PODĚKOVÁNÍ

Zde bych chtěl poděkovat vedoucímu své práce prof. RNDr. Ing. Josefu Nevrlému, CSc. za odborné vedení práce, cenné rady, připomínky a ochotu, díky kterým jsem mohl tuto práci napsat. Dále Miloslavu Ficovi a Janu Pisklákovi za poskytnuté informace.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci Využití modelu rekuperaci kinetické energie vozidel vypracoval samostatně pod vedením prof. RNDr. Ing. Josefa Nevrlého, CSc. a uvedl jsem v seznamu literatury všechny použité literární a odborné zdroje.

podpis

ABSTRAKT

Ve své práci se zabývám problematikou využití modelu rekuperace kinetické energie vozidel. Jejich přesností, aplikací na konkrétní jízdní režimy a dopravní situace. Zvláštní důraz je pak kladen na simulaci městského provozu. V první části práce je zařazeno pojednání o základních částech hydraulického systému. Dále následuje popis simulace hydraulického systému a jeho srovnání s reálnými palivovými testy a na závěr práce se věnuji metodice řízení systému.

ABSTRACT

This thesis deals with questions concerning the use of models of vehicle's kinetic energy recovery, their accuracy and their application to particular driving modes and traffic situations. Special emphasis is placed on the simulation of urban driving. The first part of the thesis includes a treatise on the basic parts of the hydraulic system. This is followed by a description of simulation of the hydraulic system and its comparison with real fuel trials, and at the end of my thesis I deal with the methodology of system management.

KLÍČOVÁ SLOVA

model, hydraulika, hybridní, vozidlo, rekuperační

KEYWORDS

model, hydraulics, hybrid, vehicle, regeneratio

OBSAH

ÚVOD	13
1 NEJZNÁMĚJŠÍ JMÉNA A SMĚRY VÝVOJE REKUPERACE ENERGIE POMOCÍ HYDRAULICKÝCH SYSTÉMŮ	15
1.1 BUCHWALD P. a kol,	15
1.2 KORKMAZ F. a kol.	15
1.3 WILLUMEIT H. P. a BENNETT B., 1982	15
1.4 WU P. a kol.	15
2 HYDRAULICKÝ SYSTÉM	16
2.1 Jednotka RDS	17
2.1.1 Hlavní problémy při návrhu HG/HM	18
2.2 Akumulátory	19
3 MODEL Y A SIMULACE	21
3.1 Model systému řízení	21
3.2 Základ modelování FMTV	21
4 SIMULAČNÍ SOFTWARE ADVISOR	23
4.1 Optimalizace	25
4.2 Optimalizační postupy	26
4.3 Studie odezвовých ploch PDREMS	26
4.4 Výsledky	27
5 PALIVOVÉ TESTY HYBRIDNÍHO FMTV (EHFT)	29
5.1 Ověření modelu	32
6 SIMULACE A ŘÍZENÍ HYDRAULICKO-HYBRIDNÍHO POHONNÉHO ÚSTROJÍ	37
6.1 Přehled řídicí strategie FMTV	37
6.1.1 Cíle strategie řízení	37
6.1.2 Pracovní strategie hybridních vozidel	37
6.2 Fuzzy logika, metoda řízení	39
6.2.1 Hodnocení vstupu	40
6.2.2 Fuzzy logic procesor	41
6.2.3 Implementace FLC do ADVISORu	43
6.2.4 Nasazení FLC do současných FMTV	44
7 ZÁVĚR	45
8 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	47
9 SEZNAM TABULEK	48
10 SEZNAM ZKRATEK	49
11 LITERATURA	50

ÚVOD

Jak se odvíjí 21. století, ekonomika motorových paliv se stává stále důležitějším faktorem pro celkovou produkci vozidel. Vozidla, která spotřebují méně paliva a mají tak nižší provozní náklady, se stávají příhodnější pro stále větší spektrum uživatelů, obzvláště v dnešní době, kdy ceny pohonných hmot směřují neúprosně vzhůru. S trendem produkce ekonomicky výhodnějších vozidel zároveň souvisí i podstatné snížení emisí, aby se vyhovělo stále přísnějším legislativám, které jsou přijímány stále ve více zemích po celém světě. Výrobci těžkých vozidel budou první, kteří by byli zasaženi růstem cen paliv a přísnějšími omezeními, týkajícími se emisí vozidel. Z tohoto důvodu je nutné najít do budoucna vhodnou alternativu.

Předmětem této bakalářské práce je koncept hybridního hydraulicky ovládaného vozidla (HHV). Hybridní vozidla využívají dvou nezávislých zdrojů výkonu pro pohon. V prvním případě se jedná o klasický spalovací motor (ICE) a druhým je rekuperační zdroj energie. Existuje několik různých způsobů ukládání energie, můžeme zmínit například elektrický (představovaný bateriemi) nebo mechanický (představovaný setrvačníky). Všechny tyto varianty přinášejí jak výhody, tak nevýhody. Hydraulický hybrid využívá hydraulicko-pneumatické zařízení (akumulátor) k uložení energie, která se získává brzděním vozidla prostřednictvím hydrostatického převodníku (hydromotor/hydrogenerátor (HG/HM)). Energie uložená v systému během brzdění je následně využita k podpoře akcelerace vozidla.

Hydraulický hybrid není konceptem nikterak novým. Výzkum na něm byl prováděn již od časných sedmdesátých let minulého století. [6-8] Nevýhody hydraulických pohonů, jako je nízká účinnost, vysoká hmotnost a problémy s řízením, vedly k brzkému opuštění skutečného vývoje v oblasti hydraulických hybridních vozidel v následujících letech. Nedávné pokroky v hydraulice a v řízení hydraulických zařízení však byly podnětem k oživení zájmu o hydraulické hybridy, přičemž vývojem se nyní zabývá společnost Australian R&D company a hlavní výrobci automobilů v USA.

V této práci je stručně popsán projekt uskutečněný výzkumnými pracovníky Monash University sídlící v Austrálii zaměřený na oblast modelování a simulace hybridního hydraulického systému PDREMS. Modelování systému PDREMS bylo realizováno v prostředí Matlab/Simulink a poté bylo implementováno do NREL's Advanced Vehicle Simulator (ADVISOR). Ověření vypracovaného modelu bylo dosaženo porovnáním vypočtené spotřeby paliva s výsledky palivových testů, prováděných na vozidle opatřeném systémem PDREMS. Zkratkou PDREMS je zastoupen Permo-Drive systém pro řízení rekuperace energie (Permo-Drive Regenerative Energy Management Systém).

Pomocí softwaru ADVISOR byly provedeny predikce výkonu PDREMS za různých provozních podmínek na sérii rozličných jízdních cyklů. Bylo také zkoumáno řízení systému a optimalizace.

1 NEJZNÁMĚJŠÍ JMÉNA A SMĚRY VÝVOJE REKUPERACE ENERGIE POMOCÍ HYDRAULICKÝCH SYSTÉMŮ

1

Pojem rekuperace energie pomocí hybridních systémů zahrnuje obsáhlou skupinu rekuperačních systémů. Těmito studiemi se zabývalo několik vědců. Nyní alespoň nastíníme ty nejvýznamnější.

1.1 BUCHWALD P. a kol,

Zvolil pro rekuperaci energie paralelní zapojení systému. Tento model využíval tři systémů řízení. Prvním byl on/off systém. Zde se systém buď zapnul, nebo vypnul. Druhou metodou řízení bylo řízení pro nejlepší účinnost. Systém se spíná vždy, kdy je potřeba velkého výkonu (např. Prudké zrychlení) a je splněna i další podmínka, a to taková, že akumulátor není zcela vybit. Další metodou řízení bylo využití systému tak, že soustava dodává stabilní krouticí moment. Tato metoda řízení umožňuje snížení kapacit ICE. Je však nutné zajistit neustálou kontrolu stavu nabití akumulátoru.

1.2 KORKMAZ F. a kol.

Zabýval se experimentální studií a uskutečnil sérii testů pro měření snížení spotřeby paliva. Dosáhl poměrně uspokojivých výsledků, kdy spotřeba paliva klesla o 20 %. V těchto testech se ukázalo, že systém je perspektivní, zároveň testy ukázaly na nedostatky a možnosti dalšího rozvoje.

1.2

1.3 WILLUMEIT H. P. a BENNETT B., 1982

Cílem jeho práce bylo rozvíjení předchozího modelu. Využíval pro tyto testy dvoupodlažního autobusu. Řešil se přenos síly od ICE. Když pracoval jen ICE, tak se část výkonu přenášela i na hydraulickou větev, a proto se tato větev blokovala. Vše se řídilo polohou plynového pedálu.

1.3

1.4 WU P. a kol.

Zde se využívalo standardního ICE a dvou HG/HM jednotek. Provádělo se několik počítačových simulací, kde se nastavovaly v každém cyklu jiné parametry komponent, aby se pak z výsledků mohla sestavit lepší strategie řízení.

1.4

Studií a simulací proběhlo mnoho. Jako další můžeme jmenovat: BASELEY S. a kol., TIKKANEN S. a kol., MARKEL T. a kol. 2002, WIPKE K. B. a kol., MOSKWA John J. a kol.[13]

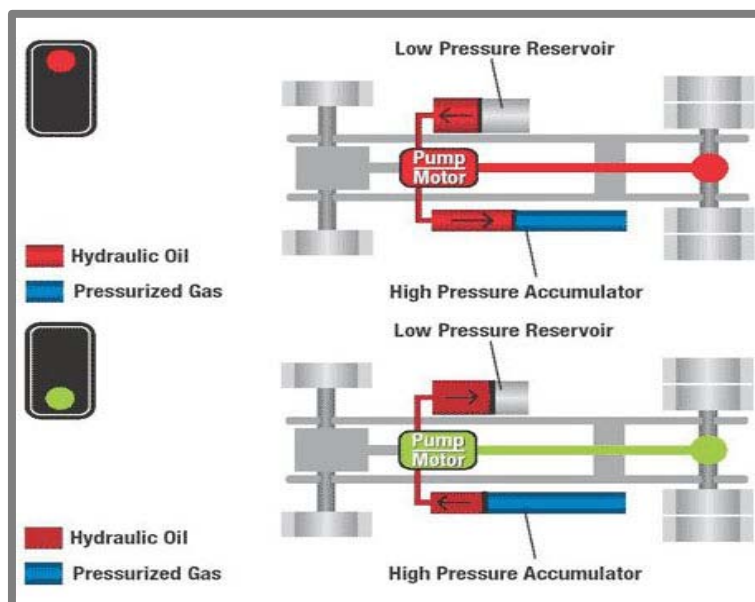
2 HYDRAULICKÝ SYSTÉM

Kompletní systém se skládá z centrálního RDS zařízení, hydraulického akumulátoru a zásobníku kapaliny. Dále obsahuje také chladič hydraulické kapaliny a filtrační jednotky, obojí není na Obr. 1 vidět. Systém ukládá nebo vydává (uvolňuje) energii prostřednictvím kapaliny pod tlakem, který se vytvoří během brzdícího procesu, a následně využívá tuto energii pro akceleraci vozidla (rozjezd – zrychlení). RDS montovaný přímo na hnací hřídel, znamená pro systém to, že je do přeměny zapojeno méně energie a tím jsou ztráty pomocné energie menší.

Vozidlem, použitým v tomto studijním případě, bylo taktické armádní vozidlo FMTV, M1084 A1 (dále jen FMTV) se specifikacemi, uvedenými v Tab. 1. Schéma pohonu nákladního automobilu s instalovaným PDREMS je vyobrazeno na Obr. 1.

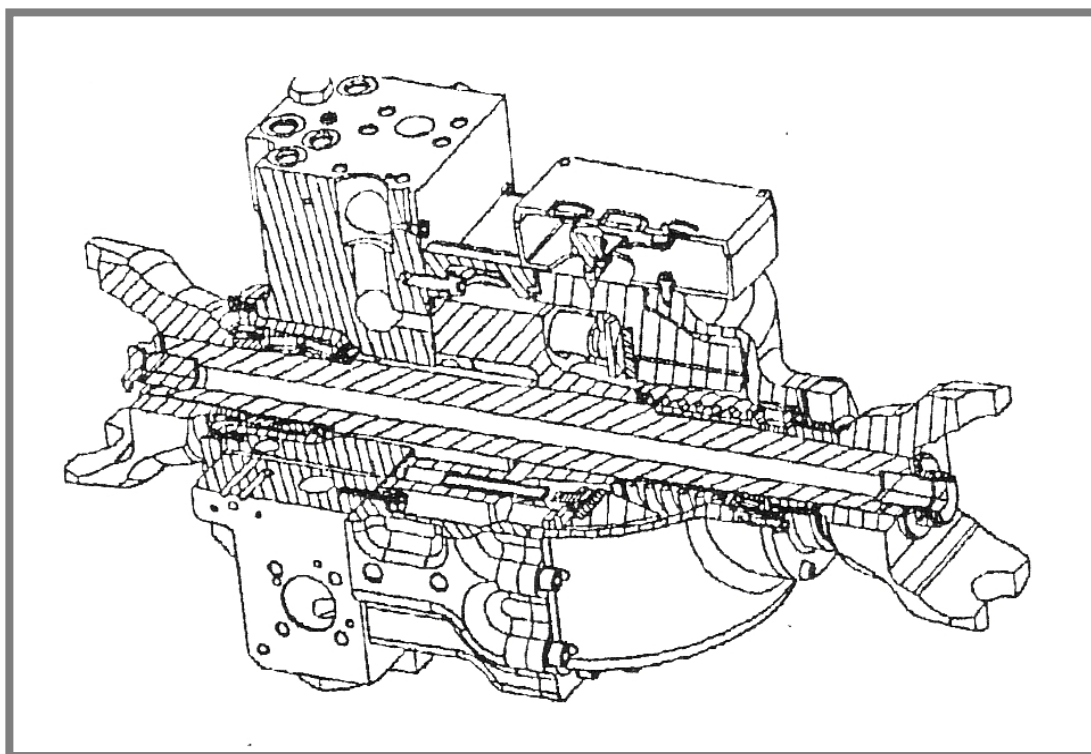
Tab. 1 Specifikace zkušebního vozidla

Testovací vozidlo:	taktické armádní vozidlo FMTV, M1084 A1
Motor:	Caterpillar 31268 246 kW Diesel
Převodovka:	Allison MD3070PT 7 Speed Automatic s měničem momentu TC-418
Hmotnost:	15 790 kg
Poměr diferenciálu:	7,8:1
Počet poháněných kol:	6



Obr. 1 Schéma hybridního hydraulického vozidla

¹ [Http://permo-drive.com/tech/index.htm](http://permo-drive.com/tech/index.htm) [online]. 2008 [cit. 2011-02-24]. Permo-drive. Dostupné z WWW: <permo-drive.com>.



Obr. 2 Rekuperační pohonný hřídel²

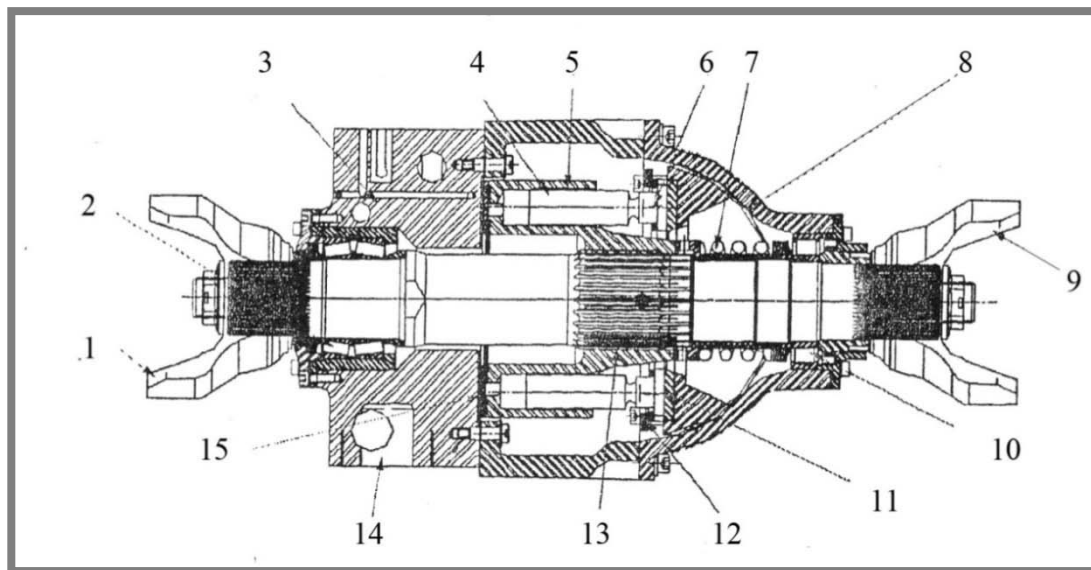
2.1 Jednotka RDS

2.1

Srdcem PDREMS je obousměrný hydrostatický převodník (HG/HM), známý jako rekuperační pohonný hřídel (Regenerative Drive Shaft (RDS)), zobrazený na Obr. 2. RDS je v podstatě axiální pístová jednotka hydrogenerátor/hydromotor, která je uložena koaxiálně s pohonem vozidla. Jednotka RDS vykonává dvě funkce. Když pracuje jako hydrogenerátor, hydrostaticky vytváří brzdňý moment na pohonu a ukládá získanou energii v akumulátorech. Při zrychlování vozidla pak funguje jako hydromotor a pomáhá klasickému spalovacímu motoru automobilu a snižuje tím jeho zatížení. Tyto dva módy jsou známy jako hnací mód a brzdící mód a jsou elektronicky řízeny polohou naklápěcí desky jednotky RDS. Elektronické řízení cyklů brzdění/pohon umožňuje optimalizovat dodávku výkonu do systému pohonu přes PDREMS. Řídicí systém RDS užívá vstupy z vozidla (jedná se například o polohu pedálu řidiče nebo stav motoru a převodovky) a vstupy z okolí (například stoupání dráhy) k výpočtu optimálního rozložení výkonu mezi PDREMS a ICE, aby bylo dosaženo požadované rychlosti vozidla při co nejmenší možné spotřebě paliva.

Kvůli celkovému rozsahu přenosu energie v systému musí být RDS schopen pracovat s vysokými tlaky a průtoky. Protože výrobci běžně neprodukují jednotky schopné splnit tyto požadavky, byl systém RDS vyvinut zvlášť pro tento účel. Technické nároky na konstrukci a výrobu takového HG/HM jsou vysoké, a proto závisí především na přístupu ke znalostem a zkušenostem s touto tematikou. Ty ale výrobci hydrostatických převodníků žárlivě střeží, což činí tento úkol poněkud obtížnějším.

² převzato [4]



Obr. 3 Některé z konstruktérských motivů během vývoje RDS³

Konstrukční prvky RDS jednotky:

- | | |
|------------------------------|-------------------------------|
| 1 – výstup do pohonu vozidla | 2 – ložisko a pojistná matice |
| 3 – kanálky | 4 – píst |
| 5 – válcový blok | 6 – třecí spojka |
| 7 – pružina | 8 – skříň kyvné desky |
| 9 – vstup od ICE | 10 – kluzák kyvné desky |
| 11 – držák kyvné desky | 12 – hlavní hřídel |
| 13 – kontrolní okruh | 14 – výstup na akumulátor |
| 15 – ventil | |

2.1.1 Hlavní problémy při návrhu HG/HM

Mezi hlavní problémy při návrhu HG/HM patří výběr materiálu pro hlavní tribologické dvojice, jako je ventilová deska/blok válce, kluzátka/naklápěcí deska atd. Dalšími jsou např. hydrodynamické jevy vyskytující se mezi částmi hydrogenerátoru dynamické interakce mezi HG/HM a pohonem.

Hydraulická jednotka HG/HM byla modelována pomocí částečně upravené Wilsonovy teorie čerpadel. Tato teorie spočívá v jednoduchých rovnicích pro průtok a moment kombinovaných s bezrozměrnými koeficienty k vyjádření objemových a mechanických ztrát. Skutečný objemový průtok HG/HM je dán následující vztahem:

³ převzato [4]

$$Q_a = \omega D \eta_{v,p/m} \quad (1)$$

V této rovnici je ω úhlová rychlost hnacího hřídele, x je část maximálního posuvu (poloha naklápěcí desky), D představuje jednotku výdeje (m^3/rad) a $\eta_{v,p/m}$ je objemová účinnost, která se liší v závislosti na tom, zda jednotka pracuje jako hydrogenerátor nebo jako hydromotor. Výpočet účinnosti zahrnuje několik dalších rovnic a koeficientů. Okamžitý moment HG/HM je dán vztahem:

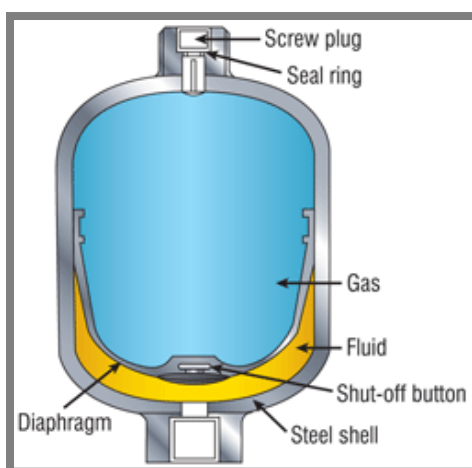
$$T_a = x \Delta p D \eta_{t,p/m} \quad (2)$$

kde Δp představuje pokles tlaku na jednotce a $\eta_{t,p/m}$ je mechanická účinnost, která je různá pro případ hydrogenerátoru nebo hydromotoru.

2.2 Akumulátory

2.2

Hydropneumatické akumulátory užívané v současné době jsou vakového typu a podobají se těm, které jsou uvedeny na Obr. 4. Akumulátor uchovává energii zachycenou během brzdění vozidla za pomoci stlačení dusíku, který je uchován ve vaku. Na počátku je dusík stlačen na počáteční úroveň – stav před nabitím, kdy v akumulátoru není olej. Když je olej čerpán do akumulátoru, plyn se stlačuje a energie se ukládá. Sdílení tepla v akumulátoru vlivem rychlé komprese a expanze může vyústit ke ztrátě energie do okolí. Tato energetická ztráta může být minimalizována použitím elastomerové pěny v plynové části akumulátoru. Druhý akumulátor v HH se používá jako nízkotlaký zásobník, který je udržován na nižším tlaku před nabitím za účelem prevence před kavitací. Do okruhu je zařazen také tepelný výměník a systém řízení čistoty oleje.



Obr. 4 Hydraulický akumulátor⁴

⁴ Machinerylubrication.com [online]. 7/2009 [cit. 2011-05-23]. Hydraulic accumulator. Dostupné z WWW: <<http://www.machinerylubrication.com>>.

Hydraulické akumulátory jsou modelovány za použití Otisovy teorie časové konstanty. Tento model byl ověřen na základě práce dalších autorů [9] a předpokládá se, že bude přesný pro celou oblast přehřáté páry.

Během komprese plynové náplně je určité množství energie ztraceno a přechází nevratně do okolí v podobě tepla. Studie ukazují, že pokusy vymodelovat chování dusíku za užití izotermických, adiabatických nebo polytropických modelů nefungují, kvůli jejich neschopnosti vypočítat tyto tepelné ztráty [10].

Za účelem bližší reprezentace p-v-T charakteristik dusíku je používána Benedict-Webb-Rubinova rovnice,

$$p = \frac{RT}{v} + \left(B_o RT - A_o - \frac{C_o}{T^2} \right) \frac{1}{v^2} + \frac{bRT - a}{v^3} + \frac{a\alpha}{v^6} + \left[c \left(1 + \frac{\gamma}{v^2} \right) e^{-\gamma/v^2} \right] \frac{1}{v^3 T^2} \quad (3)$$

kde p, v, T jsou stavové veličiny. Všechny ostatní veličiny v této rovnici jsou empirické konstanty specifické pro dusík. Postupným diferencováním rovnice (3), vzhledem k teplotě a postupem podle Otisovy teorie časové konstanty, dostáváme následující vztah.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{T_o - T}{\tau} - \frac{1}{c_v} \left[\frac{RT}{v} \left(1 + \frac{b}{v^2} \right) + \frac{1}{v^2} \left(B_o RT + \frac{2C_o}{T^2} \right) - \frac{2c}{v^3 T^2} \left(1 + \frac{\gamma}{v^2} \right) e^{-\gamma/v^2} \right] \frac{dv}{dt} \quad (4)$$

Rovnice (4) je energetickou rovnicí pro dusík, která se numericky integruje, aby vyjádřila změnu teploty v závislosti na čase, neboť objemový průtok je znám v každém okamžiku. Tato teplota je poté vložena zpět do rovnice (3), aby se získaly hodnoty tlaku v akumulátoru v pracovním cyklu. Tlak z rovnice (3) je poté použit jako hodnota pro tlak v jednotce RDS pro výpočet výstupního momentu.

Vybrané kompletní výpočtové modely jsou uvedeny v bakalářské práci Jana Piskláka. [12]

3 MODELÝ A SIMULACE

3

3.1 Model systému řízení

3.1

Modelování hybridních hnacích ústrojí v ADVISORU je předmětem postgraduálního výzkumu na Monash University. Kde byl prováděn výzkum v pojmech fuzzy logiky a optimalizace, aby bylo možno kvantitativně měřit výhody použití těchto modelů. Fuzzy logika byla vybrána z důvodu její schopnosti řídit nelineární časově proměnlivé systémy s mnoha nejistotami, jako je například automobilový pohon. První výsledky tohoto výzkumu byly pozitivní a staly se předmětem následného dalšího ověřování.

ADVISOR je zpětná simulace charakterizovaná absencí modelu pohonu. Z tohoto důvodu je ADVISOR používán pro zkoumání toho, co je možné aplikovat z hlediska řízení techniky, ale je limitován samotným reálným zařízením a jeho omezeními. Ačkoliv toto je ten případ, v minulosti byla vytvořena práce na vyvinutí modelu polohy pedálu v rámci ADVISORU, a ten byl poté použit jako vstup modelu řízení [11]. Toto umožňuje vývoj řídicího kódu k přímému stažení z ADVISORU do ECU automobilu.

Pro tento projekt byl použit model se základní strategií řízení, podobný té ve skutečném hybridu FMTV pro simulaci skutečného výkonu vozidla. Při nízkých otáčkách hřídele je účinnost RDS nízká vlivem významných objemových ztrát a při vysokých otáčkách hřídele existuje velké riziko poškození hydrogenerátoru. Proto je cílem strategie řízení prevence nežádoucích otáček RDS. Strategie řízení je základem druhového formátu a používá zpětné požadavky hnacího ústrojí na moment a otáčky pro výpočet pozice desky a finální výkonový příspěvek z PDREMS. Řídicí strategie používá jednoduchou booleovskou logiku pro určení, kdy PDREMS může nebo nemůže být použit v závislosti na stavu systému a celého hnacího ústrojí. Podrobněji o modelování PDREMS viz v [3].

3.2 Základ modelování FMTV

3.2

Modelování hydraulického hybridního FMTV je členěno do čtyř sekcí. Jedná se o jednotku HG/HM, akumulátory, řízení systému PDREMS a základní modelování FMTV.

Spolu s modelováním PDREMS je nejdůležitější mít přesný výchozí model FMTV. K dosažení tohoto cíle byly provedeny změny ve stávajícím skriptu ADVISOR a v modelových souborech. Jedná se o následující změny, které jsou níže stručně popsány.

ADVISOR byl od svého vzniku zaměřen převážně na simulace malých HEV. To znamená, že většina dostupných modelů v rámci softwaru jsou vozidla s jednoduchou poháněnou nápravou předních kol. Bylo požadováno několik malých změn v některých skriptech, aby vyhovovaly pro FMTV s šestikolovým pohonem vzhledem k náklonům vozidla při akceleraci a brzdění.

Pro bližší odhad spotřeby FMTV paliva byla vytvořena nová palivová uživatelská mapa, která užívá zabudované funkce „engmodel“ ADVISORU a také některé detaily ze specifikačního listu Caterpillar 3126b. Jsou-li známy podrobnosti o využití paliva stroje podél křivky maximálního krouticího momentu, engmodel funkce je schopna odhadnout a vytvořit mapu spotřeby paliva pro ostatní otáčky v závislosti na krouticím momentu. Systémy řízení kouřivosti FMTV byly modelovány pomocí snížení velikosti točivého momentu dostupného z ICE v 1. a 2. převodu. Tohoto bylo dosaženo užitím omezovacích bloků v měniči točivého momentu a modelů ICE.

Do změn modelu byly také zahrnuty a prostřednictvím existujících řadicích příkazů ADVISORU implementovány body řazení převodů v sedmirychlostním Allisonově převodu. Všechna ostatní obecná data, týkající se FMTV (hmotnost, součinitel aerodynamického odporu vzduchu a další), byla vložena pomocí skriptových souborů ADVISOREM jako část nastavení vozidla.

4 SIMULAČNÍ SOFTWARE ADVISOR

4

Softwarem užitým pro výzkum byl Advance Vehicle Simulator (ADVISOR), vyvinutý na National Renewable Energy Laboratory (NREL) jako část US Department of Energy's hybrid electric Vehicle program. ADVISOR je soustava skriptů a modelů pro použití v prostředí Matlab/Simulink, který je schopen řešit úlohy týkající se provozu tradičních a hybridních vozidel. Verze ADVISORU 2002 obsahuje modely elektrických hybridů, malých a těžkých vozidel, ale neobsahuje obecně použitelný hydraulický hybridní model. Model PDREMS systému byl vyvinut v Simulinku a poté byl implementován do klasického modelu pohonu obsaženého v ADVISORU. Ověření modelu bylo provedeno porovnáním s výsledky získanými z palivových testů FMTV, které se konaly v lednu roku 2003.

ADVISOR byl poprvé vytvořen v roce 1994 a jeho hlavním smyslem bylo podpořit americký vývoj systému hybridního pohonu. V roce 1998 byl ADVISOR poskytnut pro volné sdílení přes internet a od té doby byl stažen více než 4500 subjekty, ze kterých 2/3 pocházely z průmyslu a další třetina pocházela z univerzit a různých výzkumných institucí.

Ačkoliv je ADVISOR spouštěn z Matlabu, je to samostatný program se všemi uživatelskými vstupy a analýzami, které jsou uskutečňovány pomocí tří Advisor Graphic User Interfaces (GUI's). Modely v ADVISORU jsou většinou empirické a kvazistatické a užívají data shromážděná z komponentů vozidla v ustáleném stavu pro užití v Matlabu v podobě vyhledávacích tabulek. Hodnoty z vyhledávacích tabulek jsou poté korigovány pro přechodové stavy, jako jsou změny v termodynamických podmínkách, dodatečných zátěžích nebo rotační setrvačnosti hnací soustavy.

Existují tři hlavní fáze spojené s užíváním ADVISORU a každá má své vlastní GUI. První je vehicle input green, kde uživatel definuje typ vozidla k simulaci. Údaje vozidla mohou být nahrány do pracovního prostoru Matlabu jako skript pomocí GUI a potom každá část hnací soustavy (například motor, převody atd.) může být simulována nebo s ní může být manipulováno pomocí výběru jednotlivých proměnných, o které jde. Nastavení hnací soustavy, které má být použito pro simulaci, může být změněno výběrem odpovídajícího modelu v Simulinku. Poté co je vozidlo definováno, simulace je nastavena do simulačních parametrů GUI. Následně je vybrán cyklus pro simulaci spolu s dalšími různými analytickými volbami (maximální akcelerace, sklon vozovky a jiné). Finální GUI je obrazovka výsledků, kde může být analyzována výkonnost vozidla a také každá složka hnací soustavy.

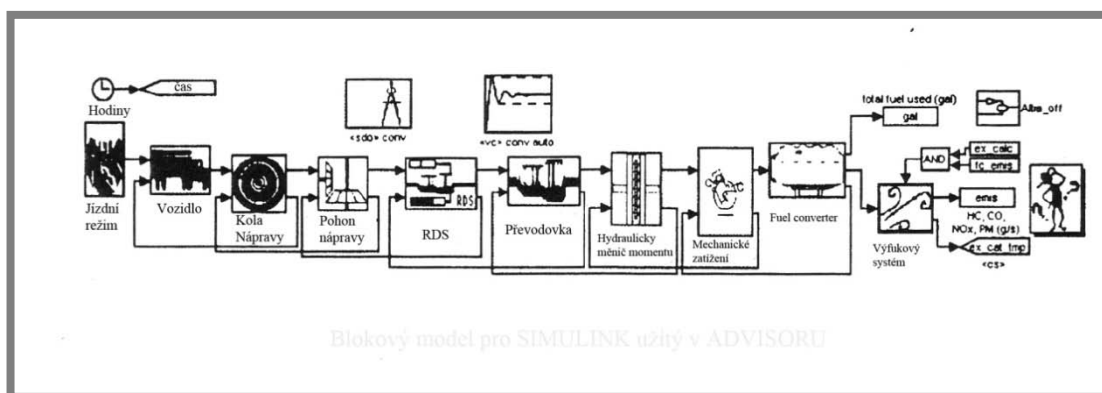
ADVISOR je kombinací dopředných a zpětných simulačních metod. Dopředné automobilové simulace začínají modelem pohonu, který určuje vstupy vozidla (polohy plynového a brzdového pedálu) skrze zpětnovazební řízení aktuální rychlosti vozidla. Poloha plynového pedálu koresponduje se spotřebou paliva a výstupním krouticím momentem motoru, který se pak přenáší přes pohonné ústrojí na kola, pro něž je vypočítána akcelerace a zvýšení/snížení rychlosti v časovém kroku. Simulace tohoto druhu vyžadují odhady rychlosti a krouticího momentu pro každý prvek hnací soustavy, což je dosaženo integrací. Za účelem získání stabilních a přesných výsledků musí být použity složité integrační metody kombinované s malými

časovými kroky. Výsledkem tohoto procesu je, že provedení těchto dopředných simulací obecně zabírá velmi mnoho času.

Jak již název naznačuje, zpětné simulace pracují v opačném směru a jsou charakterizovány absencí modelu pohonu a od počátku se u nich předpokládá, že daný cyklus pohonu pro ně bude vhodný. Dále je zde předpoklad, že vozidlo má požadovanou rychlost na konci každého časového kroku, tudíž se eliminuje potřeba modelu pohonu. Simulace začíná od rozhraní pneumatika/vozovka a pokračuje zpět k hnacímu ústrojí. Lineárně vypočítává požadovanou rychlost a krouticí moment na každém prvku, aby se zjistily požadované hodnoty. Tento proces končí odhadem finální rychlosti a krouticího momentu motoru, což je převedeno na spotřebu paliva. Simulace tohoto typu se opírá o užívání vyhledávacích tabulek, zahrnujících empiricky získaná zkušební data pro odhady ztrát a účinností. Díky explicitní povaze výpočtů mohou být užívány méně složité integrační metody s většími časovými kroky bez ohrožení přesnosti výsledků. Výsledky zpětných simulací lze získat poměrně rychle.

Problémem zpětné simulace je počáteční předpoklad, že se jedná o daný řídicí cyklus, tj. neberou se v potaz limity vozidla. Detailní řídicí strategie a analýza stability systému je také omezena kvůli absenci modelu pohonu a souvisejících příkazů vstupu od pedálu. Dynamické účinky a jejich vliv na spotřebu paliva nemohou být měřeny jen pomocí vyhledávacích tabulek, které jsou podstatnými charakteristikami systému, měřenými ve stacionárním stavu. ADVISOR představuje především zpětnou simulaci, ale tu kombinuje s omezeným prvkem dopředné simulace za účelem omezení schopností každého prvku hnacího ústrojí. Toto zajišťuje, že žádný prvek pohonu nebude vyžadovat větší krouticí moment nebo rychlost, než jejich vedlejší část je schopna dodat.

Obr. 5 zobrazuje model v Simulinku užívaný ADVISOREM v jeho simulacích. Propojení jdoucí zleva doprava reprezentují zpětné komponenty simulace, přechodné požadavky na krouticí moment a rychlost až k hnacímu ústrojí, aby se dosáhlo daného řídicího cyklu. Čáry jdoucí zpět zprava doleva představují dopřednou komponentu, která indikuje předchozímu bloku limity krouticího momentu a rychlosti, s nimiž může operovat v příštím časovém kroku. Toto umožňuje přesnější prezentaci scénářů maximálního výkonu a skutečných možností vozidla v porovnání s daným cyklem.



Obr. 5 Blokový diagram v Simulinku užitý v ADVISORU⁵

⁵ převzato [1]

4.1 Optimalizace

Optimalizační postupy jsou užity k nalezení souborů konstrukčních parametrů, které jsou optimální pro daný technický systém. Běžné použití je pro strukturovanou optimalizaci, kde hmotnost hřídele je předmětem minimalizace vzhledem k jeho rozměrovým omezením, silám a momentům, které se musí přenášet. To je případ funkční minimalizace. Pro matematické představení takového problému uvažujeme účelovou funkci $f(x)$, kterou je třeba buď maximalizovat, nebo minimalizovat. Účelová funkce je podrobena rovnicovým omezením $G_i(x) = 0$; $i = 1, \dots, m$, nerovnostním omezením $G_i(x) \leq 0$; $i = m_e + 1, \dots, m$ a parametrickým vazbám x_l, x_u .

Proto je problém formulován jako:

minimalizovat $f(x)$

$$x \in \mathbb{R}^n$$

podléhající vztahům

$$\begin{aligned} G_i(x) &= 0 & (i = 1, \dots, m) \\ G_i(x) &\leq 0 & (i = m_e + 1, \dots, m) \\ x_l &\leq x \leq x_u \end{aligned}$$

kde x je vektor konstrukčních parametrů, $f(x)$ je cílová funkce (která počítá skalár) a $G(x)$ počítá hodnoty rovností a nerovností pro každé x . Soubor 2.1 je formální matematický model optimalizačního problému.

Hlavní částí konstrukčního procesu pro hybridní vozidlo je zvolení velikosti komponent a návržení řídicího systému. Jedním z cílů projektu hydraulického hybridního FMTV je dodatečné vybavení tohoto systému a zároveň stávající komponenty pohonu budou ponechány beze změn. Velikost motoru, převodový poměr a poměry diferenciálu budou například stejné jako u konvenčního FMTV. Všechny proměnné, které jsou předmětem zájmu, jsou částmi PDREMS, kde se sleduje:

- velikost hydrogenerátoru PDREMS (cm^3/ot),
- velikost akumulátoru (l),
- tlak přednabití akumulátoru (bar).

Vezmeme-li výše uvedené do úvahy, optimalizační vzorec může být vytvořen pro FMTV problém jako:

Max $f = \text{mpg}$ (spotřeba paliva)

se zřetelem na

x = (velikost hydrogenerátoru PDREMS, velikost akumulátoru, přednabití akumulátoru) a je omezen pro 0 až 30 milí za hodinu, pro čas menší nebo roven 10 s

$$x_l \leq x \leq x_u,$$

kde x_l a x_u jsou určeny pracovními omezeními jednotky hydromotor/hydrogenerátor, hmotnostními omezeními atd.

Existují jisté podobnosti mezi činností FMTV a řízením prováděným v civilních vozidlech pro svoz odpadu či dodávkových vozech, naznačující, že pohonný cyklus takový, jako představuje Federal Urban Driving Schedule (FUDS), je reprezentativní mezi vzory pro řízení FMTV. Proto je cílem optimalizační studie nalezení ideální kombinace pro výše uvedené proměnné PDREMS takové, která maximalizuje úsporu paliva FMTV za použití FUDS.

4.2 Optimalizační postupy

ADVISOR je schopen spojení s několika různými optimalizačními programy, jak z Matlabu nebo jiného programového souboru určeného pro optimalizaci (takového jako například VisualDOC). Protože nebyly zakoupeny licence pro zvláštní optimalizační software, všechny použité optimalizační programy byly z těch, které jsou dostupné z Matlab Optimisation Toolbox (FMINCON) a algoritmu DIRECT, staženého s ADVISOREM (gelsolve.m). Popis těchto dvou následuje níže.

Optimalizační programy Matlabu jsou částmi Matlab Optimisation Toolbox, který musí být zakoupen s licencí. Nejpoužívanější funkcí pro návrh vozidla je algoritmus FMINCON. Tato metoda užívá pro minimalizaci funkcí s omezeními a hranicemi. FMINCON je postupný kvadratický programovací algoritmus (SGP), gradientní numerická metoda užívaná pro globální optimalizační problémy. Je-li dána řada hraničních omezení a počátečních bodů, bude funkce FMINCON užívat metody SGP k přiblížení se globálnímu minimu v určeném návrhovém prostoru.

Další metodou je využití algoritmu DIRECT. DIRECT algoritmus byl vyvinut Donaldem R. Jonesem. Nevyužívá gradientové metody k nalezení optima, namísto toho dělí návrhový prostor na čtyřúhelníkové sítě a pak dále provádí další členění těchto čtyřúhelníků, dokud nejsou splněna návrhová kritéria. Toto zajišťuje, že celý návrhový prostor je dostatečně pokrytý a prozkoumaný, aby žádná část problematiky nezůstala neověřena. V Matlabu je algoritmus DIRECT obsažen v souboru „gelsolve.m.“ Studie přiblížená v této bakalářské práci popisuje výsledky z výše uvedených algoritmů se softwarem ADVISOR. Nebyl prováděn žádný vývoj v oblasti optimalizačních algoritmů, pouze v jejich I/O programech, takže optimalizační účelovou funkcí byl ADVISOR.

4.3 Studie odezvových ploch PDREMS

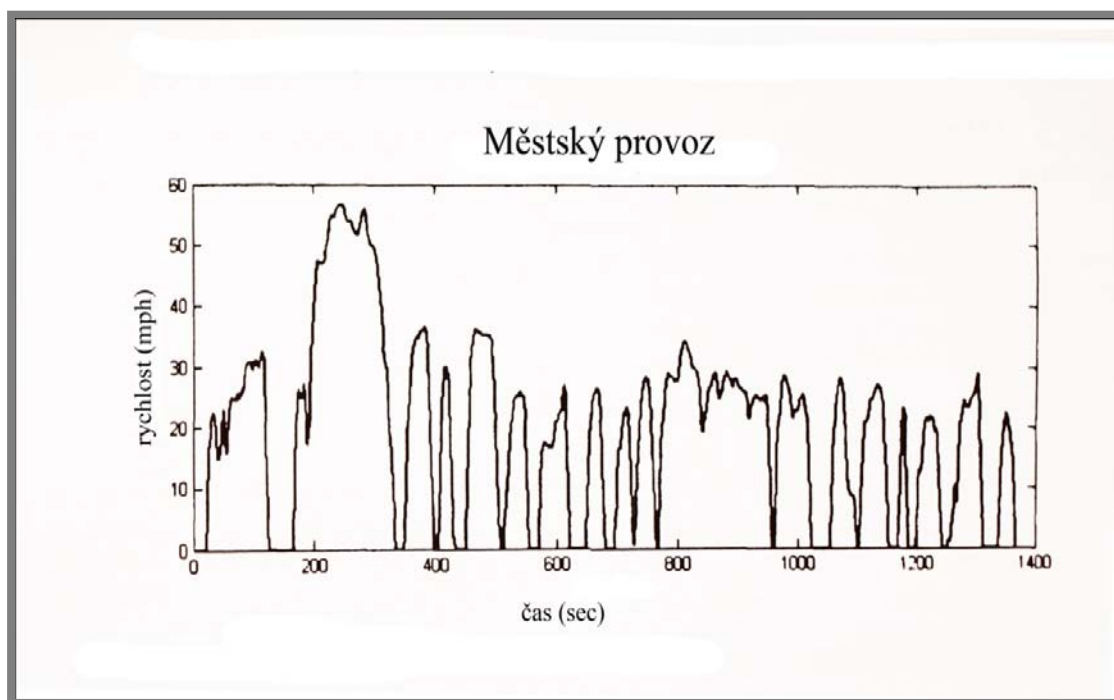
Před provedením prací, prováděných pomocí optimalizačních postupů (popsaných v následující části), byla pro systém připravena studie odezvových ploch, aby bylo možno sledovat matematickou povahu problému. Toto umožňuje viditelnou představu vztahů mezi proměnnými PDREMS a účinkem, které mají na spotřebu paliva. Tyto plochy vytvořené při provedení Design of Experiments (DOE) v ADVISORU užitím základního řídicího systému PDREMS je možné důkladně nastudovat z odborného článku.[1] Provádění takových příkladů pomáhá určit nejvlivnější parametry, poznat oblasti zájmu a zúžení omezení pro optimalizační postupy. Bylo vyhotoveno několik grafů závislosti. Zvláště byly modelovány grafy odezvových ploch, které ukazují výsledky závislosti jednotlivých součástí. Jsou to závislosti velikosti akumulátoru oproti velikosti hydrogenerátoru, velikosti

akumulátoru oproti tlaku přednabití a pro tlak přednabití akumulátoru vůči velikosti hydrogenerátoru.[12]

4.4 Výsledky

4.4

V době publikace své studie autoři Matheson a Stecki nebyli schopni uspokojivě nashromáždit výsledky při užití algoritmu FMINCON. FMINCON není uživatelem snadno použitelná funkce jako algoritmus DIRECT, protože postup nemůže být zastaven uprostřed běhu procesu a bylo nemožné dosáhnout přiblížení ke globálnímu optimu.



Graf 1 Federal Urban Driving Schedule (FUDS)

Řídicím cyklem užitým pro simulační postup byl FUDS, viz Obr. 5. Tab. 2 ukazuje uvažované proměnné a jejich sdružené horní a dolní hranice.

Tab. 2 Seznam návrhových proměnných

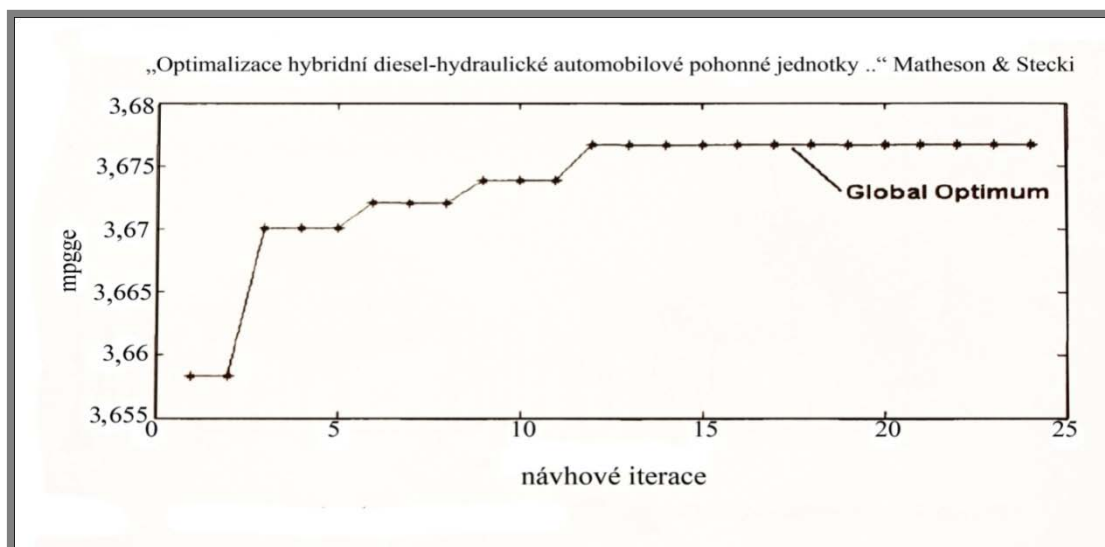
Návrhová proměnná	Jednotky	Horní mez	Dolní mez
Hydromotor/hydrogenerator	cm ³ /ot	375	325
Objem akumulátoru	litry	200	150
Přednabití akumulátoru	bar	200	150

Aby bylo možno uložit omezovací funkce optimalizačnímu programu, jedno funkční vyhodnocení by mělo být použito z testu maximálního zrychlení a jedno z FUDS. Časový krok, užitý pro optimalizační program, byl 1 s a na PC Pentium4 2,4 GHz funkční vyhodnocení trvalo 24 s. Tab. 3 a Graf 1 ukazují výsledky.

Tab. 3 Výsledky optimalizace algoritmem DIRECT

Velikost hydrogenerátoru (cm ³ /ot)		Akumulátor objem (l)	Akumulátor přednabití (bar)	Úspora (mpg)
Počátek (běžné FMTV)	346	~155	150	3.860
Koncové	374	162	191	3.9334
Vyhodnocení funkce	851			
Návrhové iterace	24			
Uplynulý čas	~6.5 hod			

Problémy, vyskytující se ve výsledkových analýzách, vznikly v souvislosti s užitím rozdílného simulačního časového kroku. Model PDREMS byl ověřen přímým porovnáním s výsledky naměřenými na Evans Head fuel trials v lednu 2003. Pro tento proces byl v ADVISORU užit časový krok 0,1 s, což pro zpětnou simulaci bylo extrémně málo, ale umožnil přesnější modelové ověření. Proto celá následující práce, za použití modelu, musela být prováděna s časovým krokem 0,1 s. Avšak užití programu Direct s malým časovým krokem zapříčiňuje „zaseknutí“ optimizátoru v místním optimu a bylo nemožné dosáhnout konvergence ke globálnímu optimu, které bylo vytipováno ze studie odezvy ploch. Optimalizační simulace s časovým krokem 0,1 s běžela přibližně 4 dny a poskytla velmi chudé výsledky, ale užitím relativně dlouhých časových kroků 1 s našel optimizátor absolutní globální optimum pro velikost komponent. Důvodem byl numerický šum vlastní simulačnímu balíku ADVISOR, pokud je spojen s krátkými časovými kroky. Kdybychom provedli zoom výše zmíněných obrázků odezvových ploch, viděli bychom malé propady a špičky na povrchu, spíše než celkově hladkou podobu, což zapříčiňuje, že optimizátor je zahlcen. Toto je numerický šum a je nejpravděpodobněji způsoben nepřesnou interpolací nebo zaokrouhlovacími chybami během simulace. V Tab. 3 jsou uvedeny velikosti komponent při užití časového kroku 1 s, ale určení úspory paliva bylo provedeno užitím časového kroku 0,1s.



Graf 2 Návrhové iterace

5 PALIVOVÉ TESTY HYBRIDNÍHO FMTV (EHFT)

V lednu 2003 byl hydraulický hybridní FMTV puštěn do série palivových testů systému a do množství testů maximální akcelerace k změření účinnosti PDREMS. Existuje mnoho norem ustavených SAE, Maintenance Council of the American Trucking Association pro nákladní dopravu a SAE-Australasia, k zajištění věrohodnosti palivových testů. Tyto normy byly úspěšně použity pro hodnocení vlivů změn v prvcích nákladního vozidla a/nebo provozních parametrů systémů na spotřebu paliva.

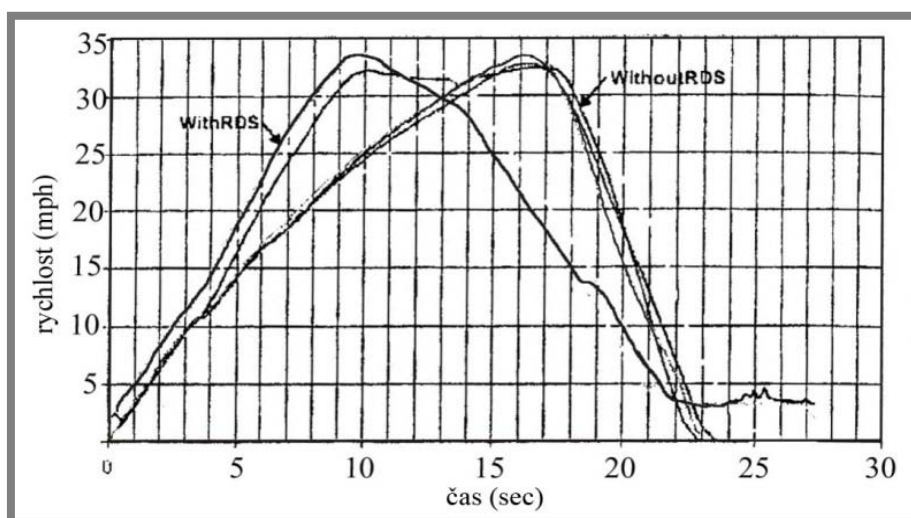
Hlavní cílem palivových testů je přesně změřit spotřebu paliva vozidla při jednom testovacím cyklu. V minulosti bylo použito mnoho způsobů, včetně užití průtokoměrů, měrek (tyčinek pro měření hloubky) a jiných zařízení, každé se svou specifickou nepřesností. Postupy SAE/TMC/SAE-A používají malou vedlejší palivovou nádrž, kterou lze snadno oddělit od vozidla a zvážit. Aplikace této techniky eliminuje nutnost použití drahých a komplikovaných měřicích zařízení a poskytuje technikům jasnější výsledky. Tento přístup byl také použit pro palivový test FMTV.

Jako u všech hybridních vozidel, rekuperační systém je skutečným přínosem pouze v stop-start městském provozu, protože množství energie ušetřené na spotřebě paliva musí být nahrazeno energií vrácenou při brzdění vozidla. Bez četného brzdění je velikost navrácené energie malá a efekt je nevýznamný. Typy řízení použité u FMTV jsou podobné jako u civilních nákladních automobilů třídy 6, proto jsou pro oba použity stejné testy.



Obr. 6 Hybridní vůz FMTV pro palivový test Evans Head⁶

⁶ [Http://www.turbosquid.com/FullPreview/Index.cfm/ID/185499](http://www.turbosquid.com/FullPreview/Index.cfm/ID/185499) [online]. [cit. 2011-02-24]. Turbosquid. Dostupné z WWW: <<http://www.turbosquid.com>>.

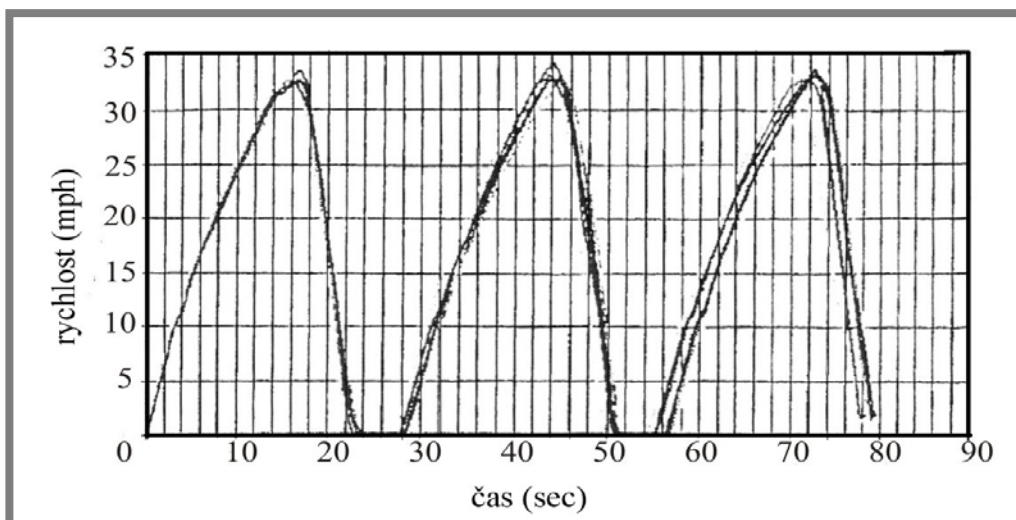


Graf 3 Porovnání rozjezdového-brzdicího běhu při zapnutém a vypnutém PDREMS

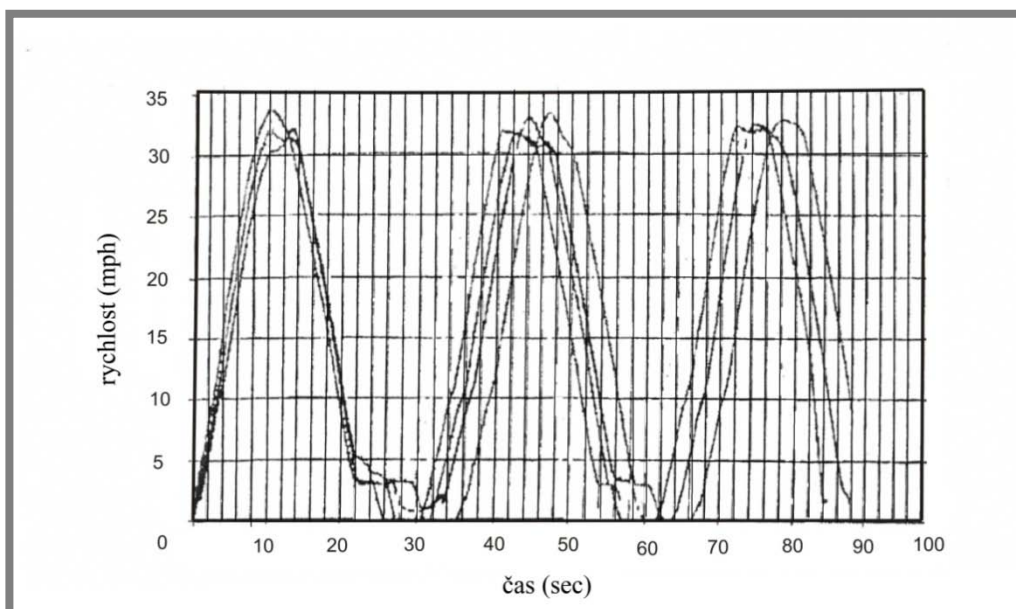
Simulace stop-start městského provozu u nákladních automobilů je úkolem značně obtížným. Možná opakovatelnost řídicího testu je nejdůležitějším aspektem, protože postup vyžaduje, aby byl opakován několikrát, jak se zapnutým, tak i s vypnutým hybridním systémem. Pokud vůz jede různou rychlostí, nebo různou vzdálenost v každém běhu, analýza spotřeby paliva se stává pouhou hádankou – odhadem. Nalezení jízdního cyklu jako „reprezentativního“ pro testované vozy je také velmi obtížné, protože provoz každého vozidla se čas od času významně mění, ať se to týká městského, vnitrostátního či vojenského užití.

Hybrid FMTV byl zkoušen na rozjezdové dráze měřící 3281 stop (přibližně 1 km) v australském pobřežním městě v Novém Walesu na východním pobřeží Austrálie (Obr. 6). Z klidového startu se FMTV rozjel na plný plyn do maximální testovací rychlosti 33 mph a poté byl brzděn do úplného zastavení na vzdálenosti 656 stop (200 m). Tento cyklus byl třikrát opakován v jednom směru trati a kužely umístěnými na trati byly vyznačeny body zastavení. Protože délka dráhy jedné trati nebyla dostačující pro měření spotřeby paliva, FMTV se musel vrátit z konce cyklu a jet opačným směrem zpět. Tento proces byl opakován osmkrát, takže celkem bylo realizováno 24 stop-start cyklů, které tvořily každý test. Protože obrátka na konci a začátku dráhy nebyla opakovatelná, byly do přívodů z přídavné nádrže nainstalovány solenoidové vypínače a tak, když se vůz musel obracet, bylo přepnuto na vlastní nádrž vozidla, ne na nádrž testovací. Tím bylo zajištěno, že měřená spotřeba paliva byla skutečně a pouze výsledkem stop-start zkoušky. K dalšímu zajištění opakovatelnosti testovacích běhů byl použit precizní Stalker radar pro přesný záznam měření rychlosti při jízdě vozidla po trati. FMTV byl puštěn do zkoušky při vlastní pohotovostní hmotnosti a se zátěží 5 t, obojí se zapnutým a poté také vypnutým PDREMS. Na začátku a konci každého běhu byla odnímatelná nádrž zvážena a došlo také k zaznamenání spotřeby. Graf 3 popisuje akcelerační-zpomalovací cyklus provedený FMTV pro každý případ PDREMS při stavu zapnuto a vypnuto. Podporu při zrychlování lze docela jasně pozorovat, když PDREMS systém začal působit okolo 10 mph. Aby se vozidlo zastavilo ve stejném místě označeném kužely, bylo nutno při testech s vypnutým PDREMS brzdit extrémně

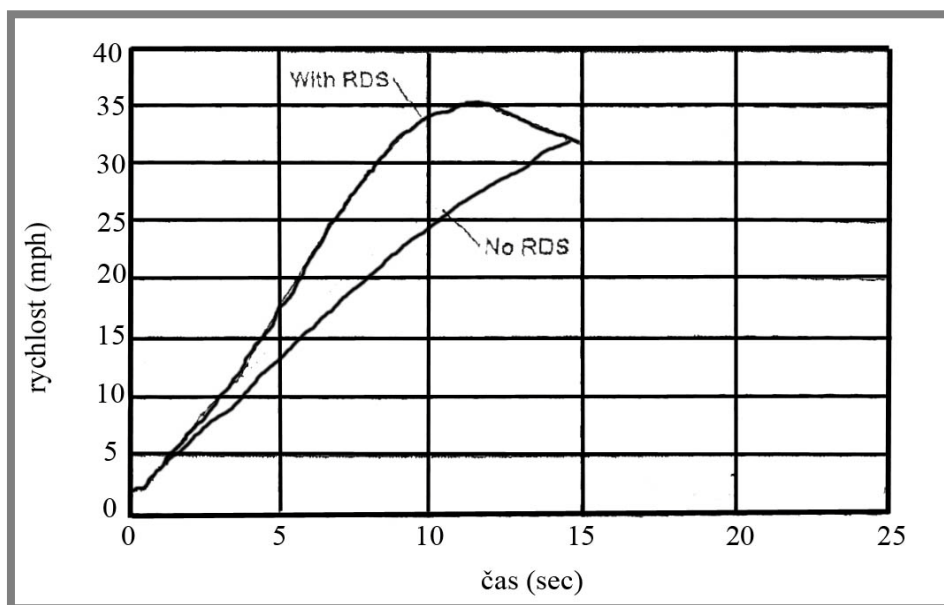
silně, poněvadž trvalo delší dobu, než se dosáhlo rychlosti 33 mph. Zkoušky při zapnutém PDREMS vyžadovaly konvenční třecí brzdy pro dosažení úplného zastavení, protože hybridní systém ukončil rekuperační brzdění okolo 5 mph. Tento fakt byl zdrojem nesrovnalostí. Dále bylo důležité, že akumulátory byly plně dobity při konečném brzdění na konci testu, což zajistilo, že do systému nebyla vnesena žádná energie z vnějšku. To je podstatné, protože efektivita PDREMS vyžaduje, aby byla měřena za podmínek, kdy je možno rekuperovat energii pomocí brzdění.



Graf 4 FMTV s pěti tunami zátěže, PDREMS zapnut



Graf 5 FMTV s pěti tunami zátěže, PDREMS vypnut



Graf 6 Porovnání maximální akcelerace („dash“)

Grafy 4 a 5 zobrazují opakovatelnost dosaženou při řadě testů. Všimneme si znamenité opakovatelnosti dosažené v případě vypnutého PDREMS. Zaznamenaná úspora paliva vzatá z průměru dvou souborů 24 akceleračně-brzdících jízd se ustálila na hodnotě 26,77 % s chybou opakovatelnosti menší než 2 %. Tento výsledek je specifický pro FMTV armádního taktického vozidla.

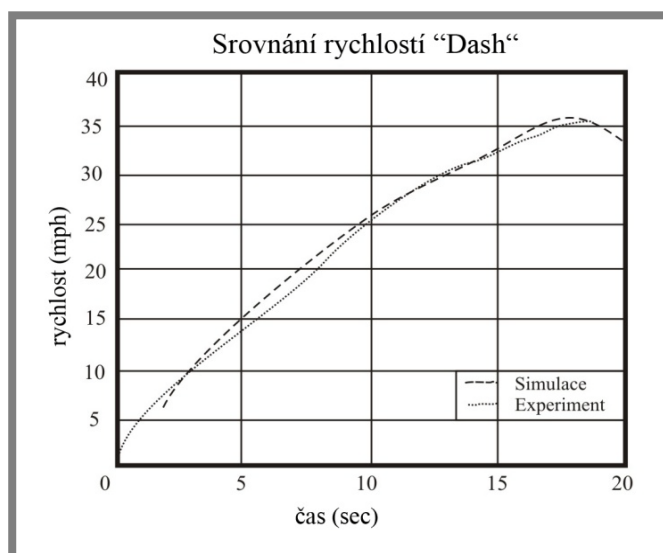
Částí testů spotřeby paliva provedených v lednu 2003 byly některé testy největší akcelerace nebo testy schopnosti „co to dá“. Spolu se vzrůstem úspory paliva FMTV je hlavním cílem projektu zvyšování schopnosti akcelerace vozidla. Tento aspekt je nejdůležitější na bojišti, protože rychlost úhybu před přicházejícím útokem je nejvyšší prioritou. Graf 6 ukazuje přímé srovnání mezi schopností vozidla akcelarovat při použití PDREMS a bez něho. Místo, kde PDREMS přispívá k akceleraci, je zcela zřejmé. Toto reprezentuje zlepšení o 38 %.

5.1 Ověření modelu

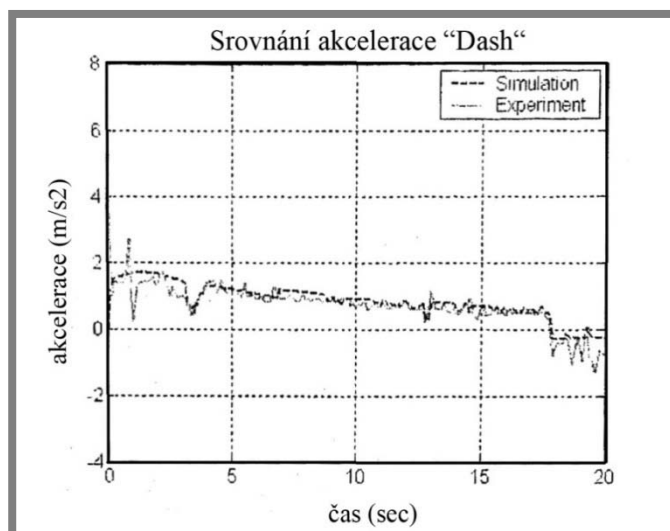
Během palivového testu byl na FMTV připevněn notebook spojený se sběrníci CAN, která sloužila pomocí programu „CANAnalyser“ k zaznamenání přenášených signálů. Zaznamenané proměnné byly použity k analýzám po testech pro vývoj řídicího systému.

Několik ze zaznamenaných proměnných bylo porovnáno s výsledky generovanými simulačním softwarem. Obr. 11, 12 a 13 ukazují rychlost vozidla, zrychlení vozidla a otáčky motoru odpovídající „prudké“ akceleraci s vypnutým PDREMS. Porovnání rychlosti vozidla ukazuje výborný souhlas, což je také patrné z grafu zrychlení vozidla. Během prvních 7 s zrychlování je hydraulický měnič momentu uvolněn a vyžaduje další analýzu.

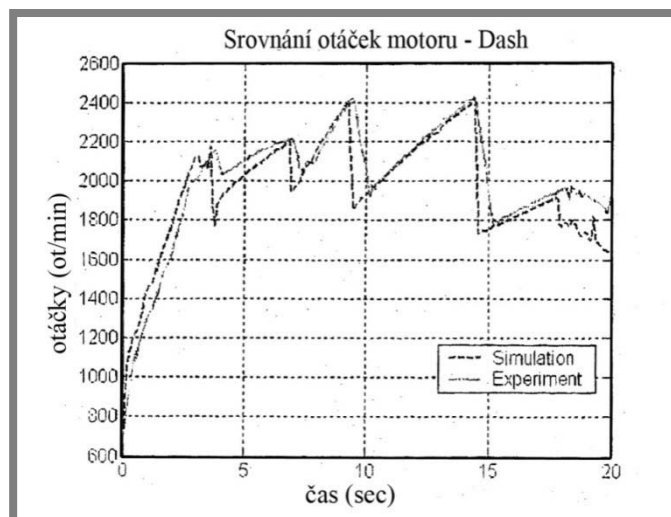
Cyklus 24 zrychlení-brzdění byl reprodukován v ADVISORU, aby se získala výsledná spotřeba paliva s chybou 2,6 % ze skutečného výsledku palivových testů.



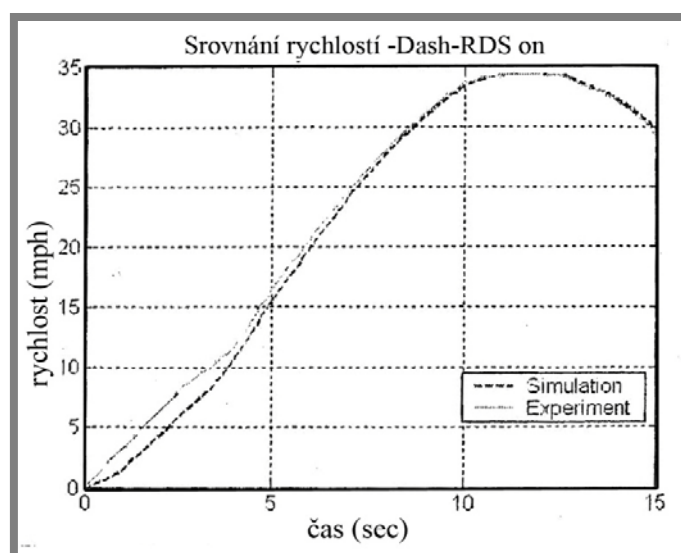
Graf 7 Porovnání rychlosti vozidla – PDREMS vypnut



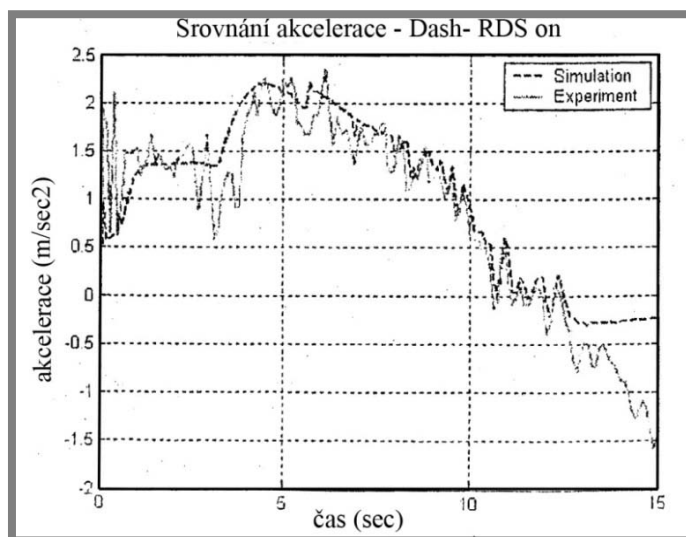
Graf 8 Porovnání rychlosti vozidla – PDREMS zapnut



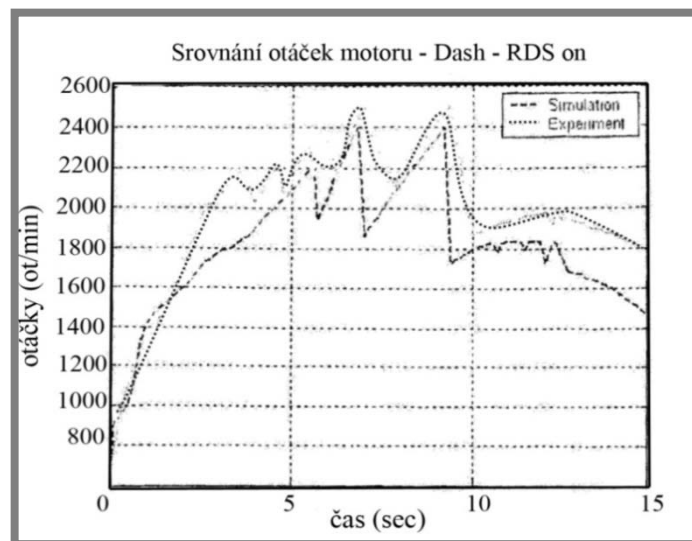
Graf 9 Porovnání otáček motoru – PDREMS vypnut



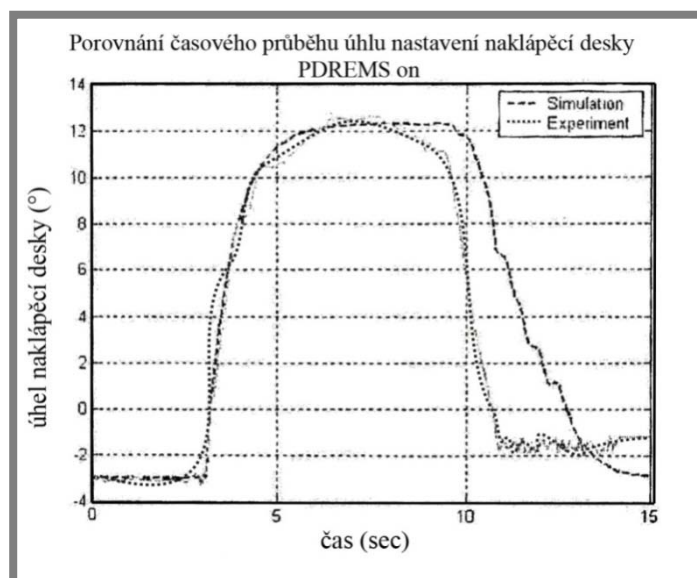
Graf 10 Porovnání rychlosti vozidla – PDREMS zapnut



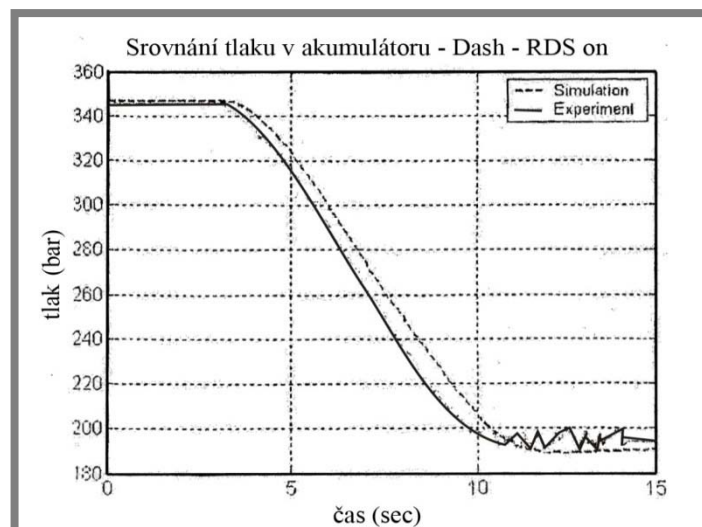
Graf 11 Porovnání akcelerace vozidla – PDREMS zapnut



Graf 12 Porovnání otáček motoru – PDREMS zapnut



Graf 13 Porovnání časového průběhu úhlu nastavení naklápací desky – PDREMS zapnut



Graf 14 Porovnání tlaku v akumulátoru – PDREMS zapnut

Pro PDREMS proměnné byla také vytvořena různá porovnání. Obr. 14 až 18 ukazují vybrané proměnné pro jízdu „na plný plyn“ s aktivovaným PDREMS. Srovnání rychlosti vozidla ukazuje dobrou shodu mimo první 4 s průběhu zrychlení. To je také případ grafů zrychlení vozidla a otáček motoru. Shoda není tak dobrá v případě vypnutého PDREMS a znovu je to vlivem neschopnosti přesně modelovat dynamické účinky v měniči momentu a účinek řízení kouřivosti. Pro úplnost jsou zahrnuty poloha naklápěcí desky a tlak v akumulátoru. Odhad spotřeby paliva pro 24 cyklů zrychlení-zpomalení byl modelován v rozpětí 2 % skutečného výsledku.

6 SIMULACE A ŘÍZENÍ HYDRAULICKO-HYBRIDNÍHO POHONNÉHO ÚSTROJÍ

6

V této části práce se budeme zabývat technikou pro řízení hybridního pohonu pomocí fuzzy logiky. Práce byla provedena již dříve pro elektrická hybridní vozidla (HEV's), avšak případ hydraulických hybridů (HH) přináší několik odlišných výzev. Zde je popsán celkový projekt hybridního rekuperačního systému a jeho metody součinnosti při brzdění a zrychlování. Fuzzy logický regulátor (Fuzzy logic controller (FLC)) pohonu je představen samostatně se základními pravidly a hlavní strategií pro provoz. Popis FLC včleněného do ADVISORU NREL byl proveden s posouzením potenciálních přínosů.

6.1 Přehled řídicí strategie FMTV

6.1

Dále se budeme zabývat specifickými úkoly FLC pro FMTV vojenská vozidla a vymezíme cíle, které jsou zvláštní pro tento typ využití vozidla.

6.1.1 Cíle strategie řízení

6.1.1

- snížení spotřeby paliva FMTV
- zvýšení maximální akcelerace (schopnosti „plného plynu“)

První cíl je rozhodující, protože náklady na udržení bojové síly v cizí zemi jsou velice vysoké. Velké procento těchto nákladů je tvořeno spotřebovanými pohonnými hmotami, které jsou nezbytné pro provoz osobních vozidel, obrněných a taktických vozidel, z nichž jedním je i FMTV. Druhý cíl je také velmi důležitý, protože rychlost úniku před náhlým útokem je na bitevním poli krajně důležitá.

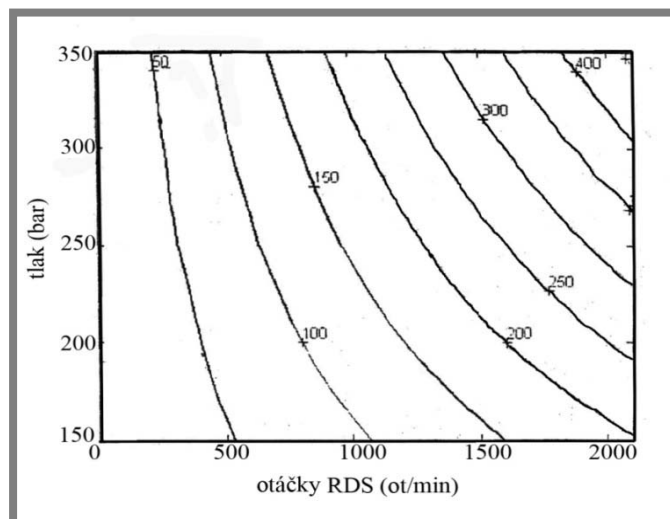
6.1.2 Pracovní strategie hybridních vozidel

6.1.2

Cílem řídicí strategie hydraulických hybridů je nalezení optimálního dělení výkonu mezi dvěma výkonovými zdroji v každém okamžiku během provozu. PDREMS je velmi přizpůsobivý, časově proměnný a dynamický systém, což způsobuje, že určení optimálního bodu pro jeho práci je velmi obtížné. Toto je typ Energy Management problému a jeden z nejvhodnějších prostředků pro řešení tohoto problému je fuzzy logika.

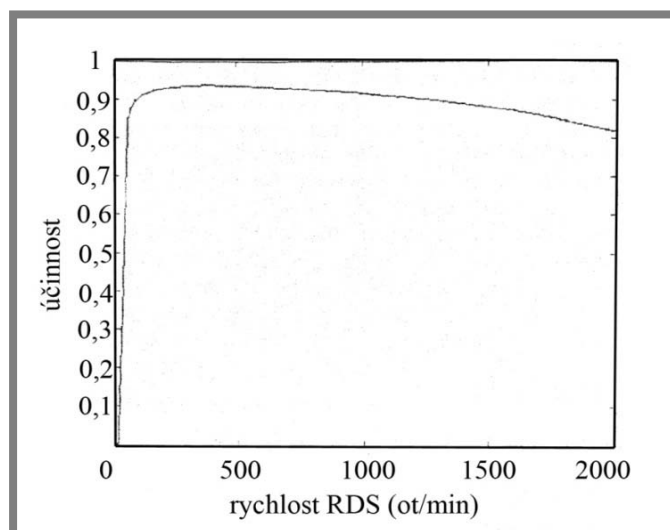
V minulosti bylo provedeno více výzkumů řízení pohonných jednotek pro HEV's, některé obsahují použití fuzzy logiky. Vzhledem k potenciálnímu užítku byla představena metodika „load leveling“, kde ICE je nucen pracovat v okolí jeho bodu nejvyšší účinnosti. U naftových motorů leží pracovní bod pro nejlepší účinnost na, nebo blízko vrcholu momentové křivky, která je také oblastí maxima palivové spotřeby. Proto load leveling, jako prostředek řízení pohonů hybridního FMTV, nemusí být nejlepší volbou.

Zde navrhovaná strategie hydraulických hybridů nabízí užití metody limitních výkonů, kde ICE je omezen ve svém výkonu, založeném na kapacitě PDREMS v každém okamžiku během pohonu. Výkonový limit je také vnucen PDREMS a bod, kde výkonový přínos z hybridního systému je předpokládán za příliš nízký, je vyloučen z užití. Návrh je vysvětlen v dalším příkladu.



Graf 15 RDS výkonové obrysy, limity, oblasti, křivky

V kterémkoliv okamžiku během módu pohonu je kapacita plného výkonu RDS určována otáčkami bloku (otáčkami hřídele), tlaky v akumulátorech a celkovou účinností (objemovou a mechanickou). Jak vozidlo zrychluje, všechny tyto proměnné se mění jedna vzhledem ke druhé, mění se celkové výkonové schopnosti RDS. Grafy 15 a 16 ukazují křivky výkonu RDS a RDS křivky účinnosti (obojí příslušné úhlům naklápění desky odpovídajícím plnému výkonu). Poznamenejme, že toto nejsou skutečné účinnosti jednotky RDS, ale počítač vygeneroval aproximace plynoucí ze standardních vzorců. Jak můžeme vidět na grafu 15, existuje zde oblast, kde je výstupní výkon RDS nízký (blízko osy y), buď z důvodů nízkých otáček hřídele, nízkého tlaku (state of charge (SOC)), nízké účinnosti nebo jejich kombinace. Proto je cílem konstruktéra ustanovit omezení nebo spodní mez činnosti RDS, která zajistí, že k použití RDS dojde jen tehdy, když RDS může poskytnout dostačující výkon.

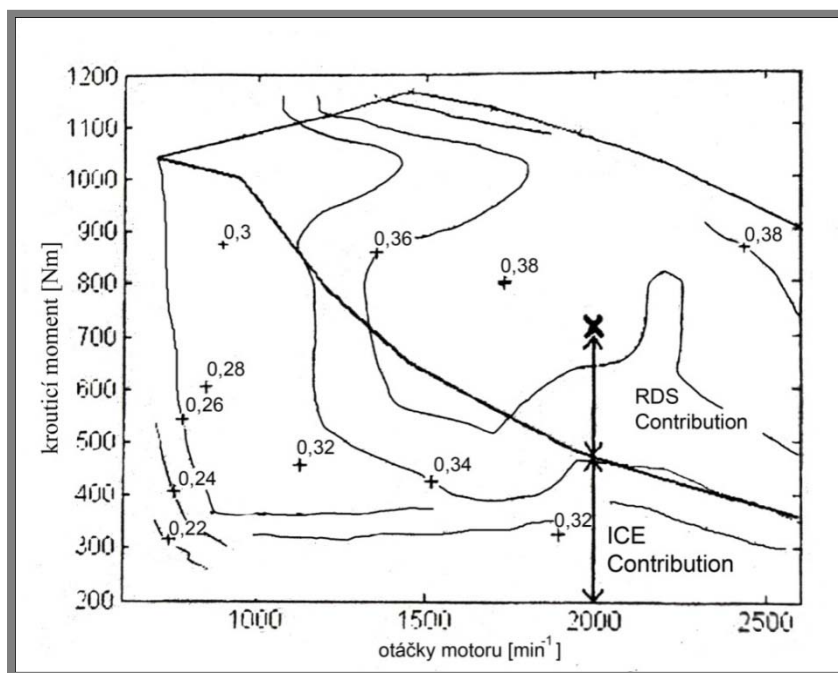


Graf 16 Křivka účinnosti RDS

Graf 17 ukazuje mapu účinnosti Diesela motoru užitého při simulaci. Tato mapa byla generována v Matlabu užitím funkce „engmodel“, vhodné pro ADVISOR. Je-li

dána spotřeba paliva v okolí vrcholu momentové křivky, engmodel je schopen generovat předpokládané plné využití pro zbytek plochy grafu rychlost-moment.

Mapa ukázaná v grafu 17 neodpovídá skutečnému výkonu motoru C31266, jedná se pouze o přiblížení za použití ADVISORu.



Graf 17 Účinnost naftového motoru s rozdělením výkonů podle ICE a RDS generovaná Matlabem

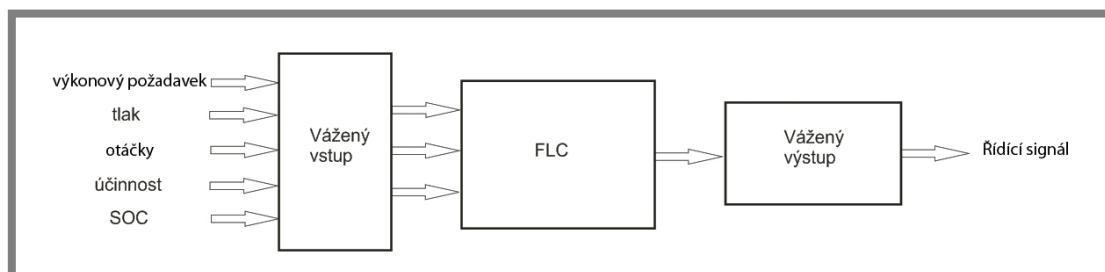
Křivka, která je zvýrazněna, představuje stálý výkon 100 kW, což je omezení pro motor, které omezuje jeho použití. x na grafu 17 představuje požadovaný pracovní bod v jednom okamžiku během provozu vozidla (150 kW). Poněvadž je to nad hranicí výkonu 100 kW, výkon, který je nad hranicí, bude převzat PDREMS (50 kW) a zbytek (100 kW) je dodán ICE. Jestliže PDREMS není schopen dodat požadovaných 50 kW (tj. SOC = 0), pak celých 150 kW musí poskytnout ICE. Toto zaručuje dobrou, hladkou činnost z hlediska řidiče.

Jak lze vidět na grafu 17, práce ICE pod 100 kW výkonovou křivkou omezuje jeho užití v oblastech nízké účinnosti. To je tento případ, avšak kdybychom chtěli použít load leveling strategii vysoké účinnosti, museli bychom se pohybovat na, nebo velmi blízko maximu momentové křivky. Maximum momentové křivky je také bodem maximální spotřeby paliva a taková technika, použitá u těžkých naftových nebo hybridních vozidel, která mají bohatě dimenzované motory, může vyústit v podobě nadměrné spotřeby paliva.

6.2 Fuzzy logika, metoda řízení

Doposud byla nastíněna jen hlavní myšlenka řídicí strategie. Fuzzy logika byla zvolena kvůli své schopnosti nelineárního řízení časově proměnných systémů s vícenásobnou neurčitostí, tak jako je tomu u automobilového pohonu.

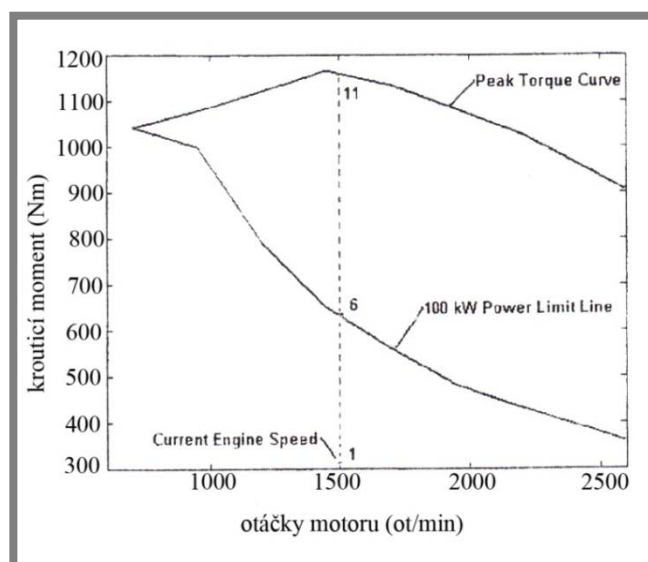
Regulátor, představený v této zprávě, je složen ze tří hlavních částí, každá z nich bude popsána odděleně. Za prvé příkazy vstupu (požadavků pro výkon, SOC) jsou ohodnoceny k jednoduššímu provádění výpočtů v Matlabu. Ty pak procházejí do fuzzy logického regulátoru, kde jsou prováděna příslušná řídicí rozhodnutí. Nakonec je výstup z FLC zpětně znovu ohodnocen, aby dal konečný výstupní signál.



Obr. 7 Celkové schéma strategie řízení HHV

6.2.1 Hodnocení vstupu

Vstupy vedené do FLC jsou ohodnoceny, aby podporovaly jednoduchost výpočtů v Matlabu. Prvním krokem regulátoru je určit výkonovou schopnost PDREMS. Okamžitý tlak v akumulátoru, rychlost a účinnost, jsou zpracovány k vytvoření výkonové hodnoty RDS („RDS Power Rank“), značené číslem na stupnici od 1 do 11. Tato čísla představují výkonovou schopnost příspěvku PDREMS. Výkonová hodnota RDS 11 znamená, že PDREMS je schopen dodat dobrou úroveň výkonu, stupeň 5 znamená, že schopnost RDS se blíží křivce výkonového omezení a číslo 1 ukazuje, že PDREMS je neschopný dodání akceptovatelného výkonu a nebude proto využit. SOC signál je vymezen od 1 do 10, 1 značí prázdný, až do 10, kdy znamená plný.



Graf 18 Metoda hodnocení vstupních požadavků výkonu

Jiný vstupní signál do FLC, který je třeba vyhodnotit, je celkový výkonový požadavek pohonu. V libovolném daném čase během práce vozidla odpovídá požadavek pro výkon pracovnímu bodu v rychlostní-momentové mapě. Tento bod je

pak vyhodnocen podle jeho pozice vzájemně k výkonové omezovací čáře ICE popsané v předchozím textu. Hodnota mezi 1 a 6 představuje výkonový požadavek, který je pod výkonovým omezením; 1 představuje nulový výkonový požadavek, 6 je na hranici. Hodnota mezi 6 a 11 hlásí výkonový požadavek nad hranicí, 11 odpovídá vrcholu momentové křivky. Tato idea je ilustrována na grafu 18. Tři hodnocené vstupní hodnoty jsou užity dalším textu.

6.2.2 Fuzzy logic procesor

6.2.2

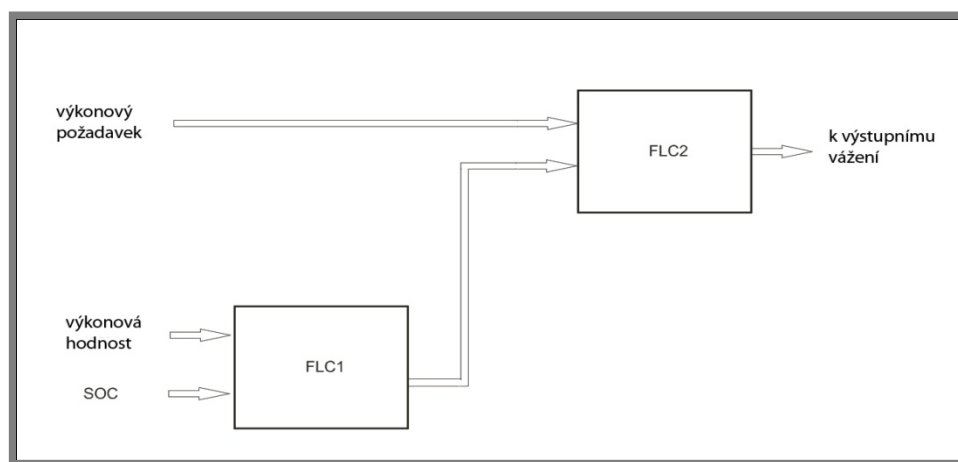
V této sekci regulátoru jsou dva vložené fuzzy logic systémy. První FLC užívá vážené RDS výkonovou hodnotu a vážený SOC k výpočtu celkové hodnoty RDS, což je hodnota, která popisuje celkový PDREMS systém. Protože hodnota RDS může stále vracet vysokou hodnotu, dokonce i když jsou akumulátory prázdné, celková RDS hodnota se bere do výpočtu akumulátoru SOC. Tento výstup z prvního FLC je pak použit jako vstup do druhého FLC během vyhodnocení výkonového požadavku. Obr. 8 ukazuje tento oddíl regulátoru s jeho třemi vstupy a jedním výstupem.

Úloha FLC není v základu rozdílná od ostatních regulátorů. Přijímá „ostrý“ (tj. určitý) číslcový vstup a vrací „ostrý“ číslcový výstup, založený na řídicích omezeních a činnostech regulátoru. Každý FLC má tři hlavní sekce nebo procesy, jak je popsáno níže.

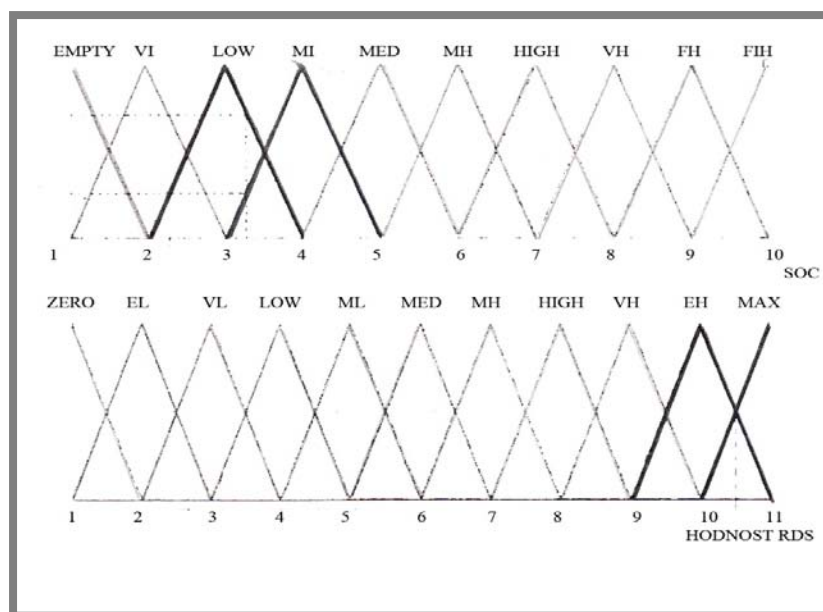
Prvním je fuzzifikace, kdy ostrý vstup do regulátoru je převeden do fuzzy vstupu, tj. převeden do tvaru, kterému může být rozuměno ve fuzzy If-then pravidlech. Např. „ostrý“ vstup teploty 305 K by byl převeden do jazykové proměnné a jeho stupeň účasti v soustavě, např. 0,75 (HIGH).

Dalším je mechanismus usuzování, kde je sekce regulátoru, jež používá lidské znalosti k vytvoření řídicích rozhodnutí ve formě fuzzy If-then pravidel.

Posledním je defuzzifikace, kdy fuzzy výstup ze směšovače je převeden do konečných „ostrých“ výstupů.

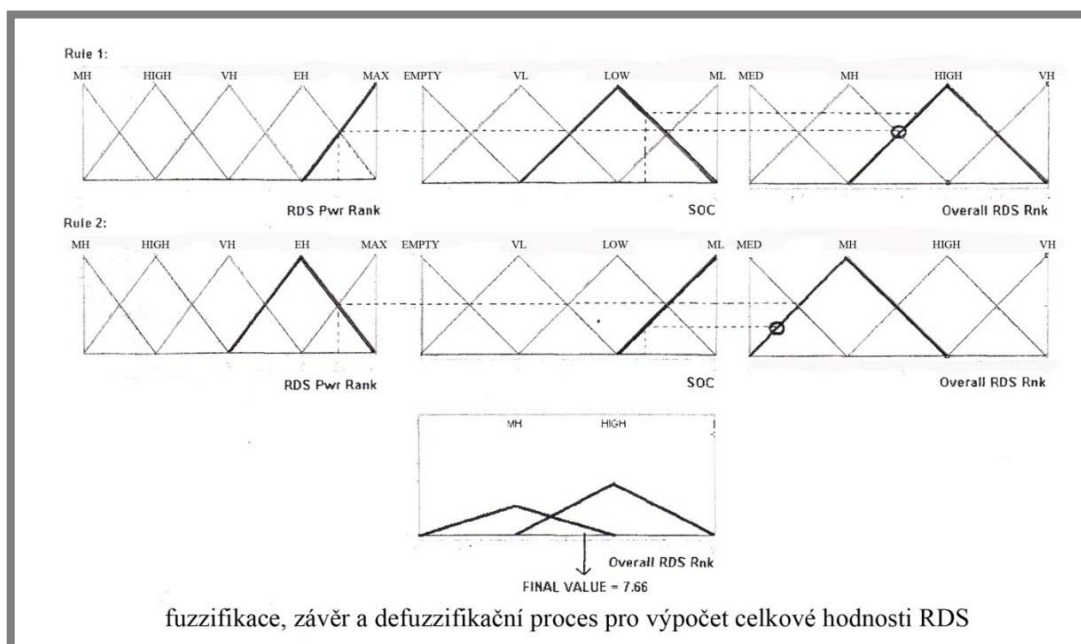


Obr. 8 Fuzzy logická sekce regulátoru



Graf 19 Vstupní funkce účasti pro vážený akumulátor SOC a výkonovou hodnotu RDS

Příklad výpočtu bude vzat z FLC 1, jenž užívá váženou výkonovou hodnotu (RDS Power Rank) a vážený SOC jako své vstupy a výstupy celkové hodnoty RDS. Množství fuzzy If-then pravidel je rovno výsledku soustav funkcí účasti pro dva vstupy. Protože výkonová hodnota RDS soubor je váha od 1 do 11, bude 11 stavových funkcí, podobně pro vážený SOC vstup bude 10 funkcí účasti. Proto zde bude pravidlová základna 110 fuzzy If-then pravidel. Aby se podpořila jednoduchost výpočtu v Matlabu, jsou tvary všech funkcí účasti v podobě trojúhelníků, mající s každou funkcí účasti přidružený jazykový název. Například funkce účasti SOC při 10 bude PLNÝ nebo funkce účasti s jejím vrcholem 6 by byla označena MEDIUM. Funkce účasti pro výkonovou hodnotu RDS a SOC jsou ukázány v Grafu 19.



Graf 20 Fuzzifikace, usuzování a defuzzifikace pro výpočet celkové hodnoty RDS

6.2.3 Implementace FLC do ADVISORu

ADVISOR je známý jako syntéza typů zpětné a dopředné pohybové simulace, v níž se předpokládá, že daný zatěžovací cyklus je aplikován na vozidlo. Výpočty jsou pak provedeny zpětnou metodou pro pohon k nalezení, jak který prvek fungoval v cyklu, odhadem spotřeby paliva konče. Přímá část je použita k výpočtu limitů každého poháněcího elementu zvlášť.

Zpětné simulace jsou charakterizovány skutečností, že není uvažován model pohonu a že simulace se řeší s momentovými a otáčkovými požadavky, spíše než se „skutečnými“ momenty.

Když vozidlo zrychluje, požadavek na určitý výkon je odeslán do pohonu původně nezměněný PDREMS blokem a je vyhodnocen v FLC. FLC užívá metody popsané v předešlém textu, bere do výpočtu stav PDREMS a určí pracovní bod pro ICE, který nejlépe odpovídá stavu pro minimální spotřebu paliva. Tato hodnota „dosaženého výkonu“ je pak přivedena zpět pohonem do bloku PDREMS, kde je výkon žádaný PDREMS spočítán podle:

$$P_{PDREMS} = P_{Total\ Request} - P_{ICE}. \quad (3)$$

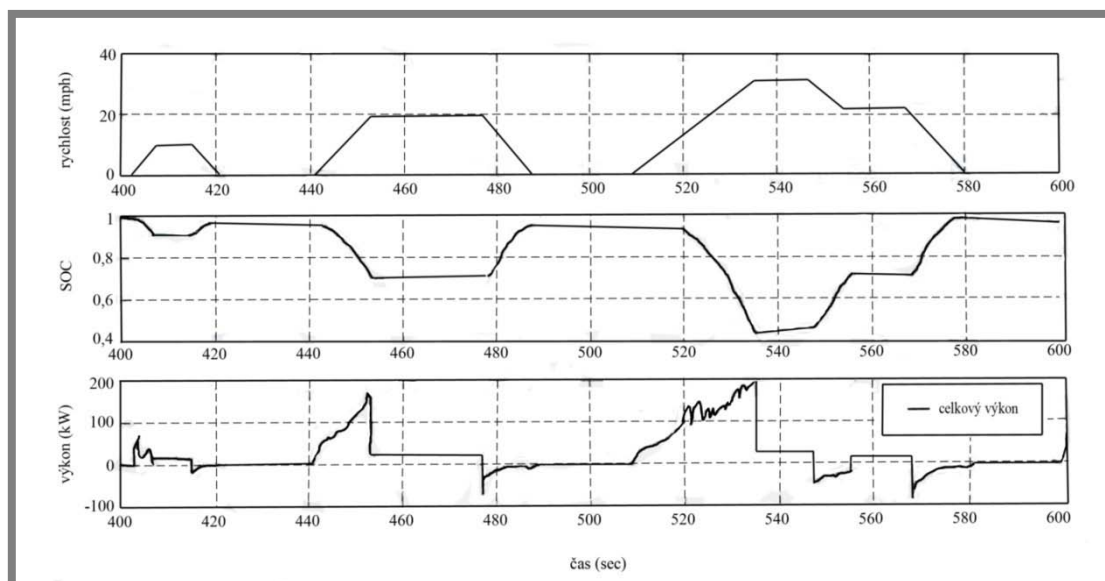
Model PDREMS pak provede nezbytné výpočty pro dodávku žádaného výkonu.

K změření efektivity bylo nového FLC bylo provedeno porovnání se současnou užívanou zdrojovou strategií řízení (viz Tab. 4).

Tab. 4 Přehled předběžných výsledků

Strategie řízení	% zlepšení mpg na základě FMTV	% zlepšení schopnosti při plném výkonu
Předchozí CS	12,35 %	44,06 %
Nová fuzzy logika CS	14,38 %	49,10 %

Ačkoliv zlepšení je jen nepodstatné, v této fázi nebyla použita optimalizace řídicích proměnných, nebo zjemnění základu fuzzy pravidel. Jednou z hlavních výhod FLC oproti rutinnímu řídicímu postupu je, že konstruktér má k dispozici vyšší stupeň řízení systému a může pohotověji rozhodnout, kdy je nejlepší okamžik pro použití uložené energie.



Graf 21 NEDC (New European Driving Cycle) analýza

Analýza modelu byla také provedena v New European Driving Cycle (NEDC) (umožňuje jasnější analýzy, kvůli jednoduchosti). Graf 21 ukazuje rychlost vozidla, akumulátor SOC, požadovaný a přenášený výkon pohonu za (200 s) krátký časový úsek cyklu.

6.2.4 Nasazení FLC do současných FMTV

Existuje mnoho důvodů pro včlenění hybridní strategie řízení do vozidla, nejen pouze fuzzy regulátoru. Protože ADVISOR představuje zpětnou simulaci, modelování současných provedení není možné. ADVISOR je užitečný nástroj v popisování, co je možné ze strategie řízení pohonných jednotek, ale není užitečný pro modelování, jak provést skutečnou implementaci. To je hlavně vlivem faktu, že není model ovladače, takže interakce mezi „ovladačem“ a systémem není uvažována, což je základem pro nasazení.

Hlavním cílem řízení hybridního pohonu, kromě maximální úspory paliva a minimálních emisí, je zajistit bezproblémový pohon vozidla, to znamená, že vozidlo bude poháněno stejně v každém okamžiku bez ohledu na stavy různých prvků pohonu. Například bylo by nemožné očekávat, že by si řidič zvykl na vozidlo, chovající se při brzdění pokaždé jinak, když položí nohu na pedál, protože akumulátorový tlak by se stále měnil.

Nasazení FLC v současných vozidlech by vyžadovalo přehledové tabulky výkonu, zpětné vazby běžných stavů pohonu, (převodový stupeň, rychlosti jednotlivých prvků atd.) a přesná měření příkazů řidiče.

7 ZÁVĚR

7

Ve své bakalářské práci jsem se zabýval popisem a rozbořem práce p. Jacka Steckiho, který od roku 2002 publikuje svůj výzkum a vývoj v oblasti řízení a simulace hydraulických hybridních systému pro těžká vojenská a civilní vozidla. Výzkum probíhá na australské Monash University. Jako modelové vozidlo bylo použito taktické armádní vozidlo FMTV, M1084 A1 s motorem Caterpillar 31268 246 kW Diesel. Nasazení systému rekuperace kinetické energie do praxe má hned několik výhod. Hlavní výhodou je akumulace energie získané při brzdění vozidla a její následné využití při rozjezdu vozidla. Nejvýznamnějším důsledkem využití této energie je snížení spotřeby paliva. I mezi laickou veřejností je všeobecně známo, že největší spotřeba paliva se uplatňuje při rozjezdech vozidla. Nejmarkantněji si může tuto informaci ověřit v praxi každý řidič, který je nucen pohybovat se v městském provozu, kdy se opětovné brzdění a rozjezdy střídají s vysokou frekvencí. Co se týče autobusů a odpadových vozů technických služeb, jsou opakované rozjezdy ještě častější než u osobních a klasických nákladních aut, tudíž tento rekuperační systém, popsáný v této práci, má pro tyto vozy do budoucna potencionálně velký význam. Průměrná spotřeba u těžkých vozidel se pohybuje často i přes 30 litrů paliva na sto ujetých kilometrů. Vezmeme-li v úvahu, že například ve vozových parcích soukromého i veřejného sektoru České republiky jsou stále ještě používány převážně starší modely těchto typů vozidel, výsledná spotřeba je mnohdy ještě vyšší. Proto úspora paliva, která byla dosažena při palivových testech s vozidlem FMTV, M1084 A1 a která se ustálila na necelých 27 %, je zjištěním poměrně významným a pozitivním. Další výhodou, kterou ocení hlavně armáda a především její taktická divize, je zlepšení akcelerace vozidla, což je významné při úhybných manévrech v bojových situacích. Všechna tato pozitiva vyjadřují nesporný potenciál tohoto systému. S ohlednutím na celosvětově se snižující zásoby všech typů fosilních paliv je jakékoliv snížení spotřeby paliva velmi vítáno a žádáno. Jedním s možných řešení této neútesné situace v oblasti paliv by byla kompletní obměna celého vozového parku. Avšak v plošném měřítku je tato idea naprosto nereálná a těžko představitelná. Je tedy žádoucí, aby se nejen automobilový průmysl zaměřil na hledání jiných alternativ, sloužících k zvýšení efektivity využití paliv a k jejich razantnímu šetření. Jistou potencionální nadějí v horizontu několika příštích let se stává právě rozvoj rekuperační jednotky, kterou lze vestavět i do stávajících vozidel a již nyní je u koncových odběratelů tento systém vyhledáván. Avšak zmapovat kompletní budoucí rozvoj v této oblasti je nanejvýš obtížné. Jednotlivé společnosti po celém světě se sami vydaly cestou jednotlivého rozvoje hydraulických hybridních systémů pro své produkty a své know-how si bedlivě střeží. Komplexnějšího vývoje založený na spolupráci více průmyslových subjektů by do budoucna byl jistě efektivnější a pro volbu kooperace hraje i ekonomický faktor. Ojedinělou snahou o spolupráci je například snaha několika australských nákladních společností, které se dokonce spojily a vytvořily průmyslové partnerství pro vývoj konceptu HH.

Rozvoj hydraulických hybridních automobilů je již poměrně dlouho známou věcí. Počátky vývoje tohoto systému sahají do sedmdesátých let minulého století a od té doby tato oblast prochází neustálým vývojem a úpravami. Několikrát však došlo i k úplnému odložení této problematiky a to z několika závažných důvodů. Hlavními důvody byly, že spolu s rozvojem hydraulické rekuperace se musely rozvíjet i další obory, se kterými hydraulika tvořila uzavřený celek. Největším problémem se poté

ukázal fakt, že rekuperační jednotka RDS je poměrně dosti sofistikovaný nástroj, který používá vysoké tlaky a průtoky hydraulického media. Bohužel, se standardně takové součásti v tehdejší době nevyráběly sériově. Tudiž celkové snahy o pokrok v dané problematice nebyly omezeny jen snahou o vývoj samotné konstrukce jednotky RDS, ale zahrnovala i studii a vývoj jednotlivých komponent zařízení. Mezi tyto komponenty se řadí například vysokotlaké vedení či těsnicí prvky. Dalším limitním prvkem bylo řízení celého systému rekuperace. Přelomovým byl rok 2002, kdy se systém řízení PDREMS začal modelovat pomocí Fuzzy logiky. Tento obor prodělal taktéž značný rozvoj a teprve s ním se mohlo úspěšně pokročit i s celkovým vývojem hydraulické rekuperace energie.

Tato práce charakterizuje detaily vývoje Permo-systému pro řízení rekuperace energie (Permo-Drive Regenerative Energy Management System (PDREMS)) – hybridní hydraulický systém orientovaný zejména pro použití u těžkých vozidel. Celkový systém modelování byl vytvořen v NREL's Advance Vehicle Simulator (ADVISOR). Jednotlivé modely a simulace jsou založeny na výsledcích optimalizačního algoritmu DIRECT, které se uplatňují v hydraulických hybridních automobilových pohonech. Pro simulaci úspory paliva pro zátěžový cyklus jakým je např. FUDS byl použit simulační balík ADVISOR. Do tohoto systému vstupují proměnné jako jsou např. velikosti všech dílů rekuperačního systému. Při použití tohoto systému bylo zaznamenáno mezní zlepšení palivového ekvivalentu přibližně o 2 %. Je nutné zmínit, že výzkum byl směřován tak, aby výsledný rekuperační systém mohl být nainstalován do stávajících vozidel bez nutnosti provádět jakékoliv změny v základním pohonu vozidla. Pokud bychom chtěli udělat systém s větší úsporou paliva, bylo by nutné aplikovat optimalizaci na celé pohonné ústrojí tzn. velikost ICE atd.

Těžiště výzkumu bylo na Monash university a jeho zaměření bylo na oblast simulace a řízení hydraulických hybridních vozidel. Celá práce byla prováděna v prostředí simulačního balíku ADVISOR, který byl implementován do Matlabu. Jako nejlepší prostředek pro řízení tohoto modelu se ukázalo užití FLC souběžně s optimalizační technikou pro navržení velikosti dílů PDREMS. Hlavní řídicí omezení pro FLC, popsané v této práci, jsou limitní čáry výkonu ICE a PDREMS a jsou proto optimalizovatelné pomocí Matlabu pro daný zátěžovací cyklus, např. takový jako FUDS. Metody byly také zkoumány za účelem optimalizace základních pravidel FLC, aby poskytly maximální ekonomičnost spotřeby paliva. Spolu s tímto se výzkum zaměřil i na řazení převodových stupňů, a to tak, aby se pracovní otáčky ICE pohybovaly kolem nejvhodnějšího pracovního bodu. FLC je možné také zkoumat jako nástroj pro přímou metodu simulace. Jednalo by se však o mnohem rozsáhlejší projekt, který by byl náročný jak z hlediska časového horizontu, tak z finanční stránky.

8 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ⁷**8**

Obr. 1	Schéma hybridního hydraulického vozidla	16
Obr. 2	Rekuperací pohonný hřídel	17
Obr. 3	Některé z konstruktérských motivů během vývoje RDS.....	18
Obr. 4	Hydraulický akumulátor	19
Obr. 5	Blokový diagram v Simulinku užitý v ADVISORU.....	24
Graf 1	Federal Urban Driving Schedule (FUDS)	27
Graf 2	Návrhové iterace	28
Obr. 6	Hybridní vůz FMTV pro palivový test Evans Head	29
Graf 3	Porovnání rozjezdového-brzdícího běhu při zapnutém a vypnutém PDREMS	30
Graf 4	FMTV s pěti tunami zátěže, PDREMS zapnut	31
Graf 5	FMTV s pěti tunami zátěže, PDREMS vypnut.....	31
Graf 6	Porovnání maximální akcelerace („dash“)	32
Graf 7	Porovnání rychlosti vozidla – PDREMS vypnut	33
Graf 8	Porovnání rychlosti vozidla –PDREMS zapnut.....	33
Graf 9	Porovnání otáček motoru - PDREMS vypnut	34
Graf 10	Porovnání rychlosti vozidla – PDREMS zapnut.....	34
Graf 11	Porovnání akcelerace vozidla – PDREMS zapnut	34
Graf 12	Porovnání otáček motoru – PDREMS zapnut	35
Graf 13	Porovnání časového průběhu úhlu nastavení naklápěcí desky – PDREMS zapnut	35
Graf 14	Porovnání tlaku v akumulátoru – PDREMS zapnut	35
Graf 15	RDS výkonové obrysy, limity, oblasti, křivky	38
Graf 16	Křivka účinnosti RDS	38
Graf 17	Účinnost naftového motoru s rozdělením výkonů podle ICE a RDS generovaná Matlabem	39
Obr. 7	Celkové schéma strategie řízení HHV	40
Graf 18	Metoda hodnocení vstupních požadavků výkonu	40
Obr. 8	Fuzzy logická sekce regulátoru.....	41
Graf 19	Vstupní funkce účasti pro vážený akumulátor SOC a výkonovou hodnotu RDS	42
Graf 20	Fuzzifikace, usuzování a defuzzifikace pro výpočet celkové hodnoty RDS	42
Graf 21	NEDC (New European Driving Cycle) analýza	44

⁷ grafy jsou převzaty z [1-5]

9 SEZNAM TABULEK

Tab. 1	Specifikace zkušebního vozidla	16
Tab. 2	Seznam návrhových proměnných	27
Tab. 3	Výsledky optimalizace algoritmem DIRECT	28
Tab. 4	Přehled předběžných výsledků	43

10 SEZNAM ZKRATEK**10**

(ADVISOR)	Advance Vehicle Simulator
(FLC)	Fuzzy logic controler – Fuzzy logický ovladač
(FMINCON)	Optimalizační programy, které jsou dostupné z Matlab Optimisation Toolbox
(FUDS)	Federal Urban Driving Schedule – Městský jízdní plán
(HEV's)	Hybrid Electric vehicles –elektrická hybridní vozidla
(HG/HM)	hydromotor/hydrogenerátor
(HH)	hydraulický hybrid
(HHV)	Hybrid Hydraulic Vehicle – hybridní hydraulická vozidla
(ICE)	Internal Combustion Engine – spalovací motor
(NREL)	National Renewable Energy Laboratory – Národní laboratoř pro rekuperaci energie
(PDREMS)	Permo-Drive Regenerative Energy Management System – rekuperační systém Permo-Drive pro řízení rekuperace energie
(RDS)	Regenerative Drive Shaft – rekuperační hnací hřídel
(SOC)	state of charge – stav nabití
(FMTV)	Family of Medium Tactical Vehicles – „rodina středně těžkých taktických vozidel
(NEDC)	New European Driving Cycle – nový evropský jízdní cyklus
(ECU)	Engine Control Unit – řídící jednotka automobilu
(EHFT)	Evans Head Fuel Trials „zkoušky paliva Evans head
(mpgge)	miles per gallon gasoline equivalent – energie hybridu přepočtena na spotřebu paliva

11 LITERATURA

- [1] MATHESON, Paul L.; STECKI, Jacek S. Optimisation of a hybrid diesel-hydraulic automotive powertrain using ADVISOR, Matlab and Simulink. *Australien Journal of Mechanical Engineering*. 2005, No.1, s. 43-48.
- [2] STECKI, Jacek S., et al. DEVELOPMENT OF A HYRAULIC DRIVE FOR A NOVEL HYBRID DIESEL-HYDRAULIC SYSTEM FOR LARGE COMMERCIAL VEHICLES. *Fluid Power. Fifth JFPS international Symposium*. 2002, 3, s. 425-430.
- [3] MATHESON, Paul L.; STECKI, Jacek S. DEVELOPMENT OF HYBRID DIESEL-HYDRAULIC SYSTEM FOR LARGE COMMERCIAL VEHICLES. The Eight Scandinavian International Conference on Fluid Power. SICFP'03, 2003. Tampere, Finland, s. 1251-1261.
- [4] MATHESON, Paul; STECKI, Jacek. Development and simulation of a hydraulic-hybrid powertrain for use in commercial heavy vehicles. *SEA International*. 2003, č. 01, s. 25-33.
- [5] MATHESON, Paul L.; STECKI, Jacek S. Modeling and Simulation of a Fuzzy Logic Controller for a Hydraulic-Hybrid Powertrain for Use in Heavy Commercial Vehicles. *Sae International*. 2003, 01, s. 1-10.
- [6] Searl Dunn, H. and P.H. Wojciechowski. "High-Pressure Hydraulic Hybrid with Regenerative Braking". Seventh Intersociety Energy Conversion Engineering Conference Proceedings. 1972. San Diego California
- [7] Buchwald, P., et al., "Improvement of Citybus Fuel Economy Using a Hydraulic Hybrid Propulsion System – A Theoretical and Experimental Study". SAE Paper 790305, 1979.
- [8] Riviera, A.M., "Hydraulic Accumulator Technology Boots Transit Bus Fuel Economy". SAE paper 860648, 1983.
- [9] Green, W.L. "Accumulator Time Constants and the 'index' Method: Some Comparisons Based on Experimental Data". 35th Natiuonal Coference on Fluid Power, 1979.
- [10] Otis, D.R. "Predicting Performance of Gas Charged Accumulators". *First Fluid Power Controls and Systems Conference*. 1973. Uni. Madison, Wisconsin
- [11] Panagiotidis, M., G. Delagrammatikas, and D.Assanis, "Development and Use of a Regenerative Braking Model for a Parallel Hybrid Electric Vehicle". SAE Paper 2000-01-0995, 2000.
- [12] PISKLÁK, J. Mechanickohydraulický model rekuperace energie vozidel. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. XY s. Vedoucí bakalářské práce prof. RNDr. Ing. Josef Nevrlý, CSc..
- [13] FIC, M. *Modely rekuperace kinetické energie vozidel*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 54 s. Vedoucí bakalářské práce prof. RNDr. Ing. Josef Nevrlý, CSc..