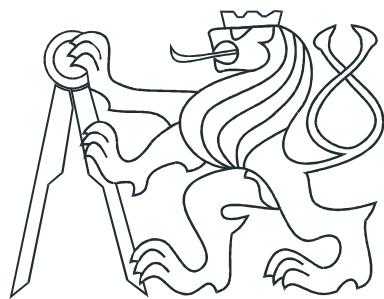


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ŘÍDICÍ TECHNIKY



DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Simulace a návrh řízení nové koncepce
lineárního spalovacího motoru**

Praha, květen 2012

Autor: Bc. Martin Němec

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v přiloženém seznamu.

V Praze dne 11. května 2012

Martin Kunc

podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval všem lidem, bez nichž by nemohla tato práce vzniknout, především mému vedoucímu diplomové práce panu *Ondřeji Vysokému* za vedení, připomínky a poznámky k práci. Dále *Tomáši Haubertovi* za cenné připomínky a ochotnou spolupráci. Také bych chtěl poděkovat *Jiřímu Sehnalovi* za pomoc při řešení problémů se systémy dSpace.

Abstrakt

Tato práce se zabývá tzv. lineárním spalovacím motorem, který na rozdíl od konvenčního rotačního řešení neobsahuje klikový mechanismus. Přímočarý pohyb pístů je bez dalších převodů transformován na elektrickou energii. Koncepce volných pístů přináší mnohé výhody, ale zároveň klade vysoké nároky na řídicí systém. Diplomová práce řeší dva hlavní úkoly – přenos kompletного řídicího systému na novou platformu a vytvoření simulačního modelu nové mechanické koncepce motoru s volnými písty.

V rámci prvního úkolu byl upraven a přenesen úplný řídicí systém lineárního spalovacího motoru na novou platformu dSpace MicroAutoBox a celý systém byl na této nové platformě oživen. V rámci druhého úkolu byl vytvořen matematický a simulační model nové mechanické koncepce motoru s volnými písty a byly stanoveny podmínky, za kterých by tato koncepce mohla přinést zlepšení parametrů motoru. Simulační model byl upraven pro nástroj dSpace ControlDesk pro snadné zadávání změny parametrů podsystémů motoru.

Abstract

This thesis deals with the linear combustion engine which unlike the conventional rotating motor does not use crank mechanism. Linear movement of pistons is directly transformed to electrical energy. The free pistons concept brings many advantages, however it considerably increases the motor control system demands. The thesis deals with two main tasks – transfer of the thorough control system to a new platform and development of a new free-piston engine mechanical conception simulation model.

Within the frame of the first task the whole linear comubstion engine control system was modified and transferred to the dSpace MicroAutoBox platform. Then functionality of the control system was tested. Within the frame of the second task mathematical and simulation model of a new free-piston engine mechanical conception was developed and prerequisites enabling enhancement of motor parameters were established. The simulation model was adjusted for implementation in dSpace ControlDesk tool to enable easy modification of motor subsystem parameters.

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

katedra řídicí techniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Martin Němec**

Studijní program: Kybernetika a robotika

Obor: Systémy a řízení

Název tématu: **Simulace a návrh řízení nové koncepce lineárního spalovacího motoru**

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s principem řízení funkčního vzorku lineárního spalovacího motoru LCE-02P.
2. Přeneste a upravte úplný řídicí systém motoru na novou platformu D Space Microautobox a celý systém na této nové platformě oživte.
3. Navrhнete simulační model nové koncepce lineárního motoru podle [3].
4. Stanovte podmínky, za kterých by nová koncepce motoru přinesla zvýšení výkonové hustoty a dalších parametrů motoru.
5. S využitím možností nástroje Control Desk upravte simulaci pro snadné zadávání změny parametrů vybraných podsystémů motoru.

Seznam odborné literatury:

[1] D Space Microautobox, uživatelský manuál

[2] Němeček P.: Řízení lineárního spalovacího motoru, Doktorská práce, FEL Praha 2009

[3] Vysoký O.: Lineární motorgenerátor s volnými písty, Cs. Patent č. 302 310, Praha 2011

Vedoucí: Doc.Ing. Ondřej Vysoký, CSc.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2011/2012

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry





prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 19. 4. 2012

Obsah

Seznam obrázků	viii
Seznam tabulek	x
1 Úvod	1
1.1 LCE	1
1.1.1 Pracovní cyklus LCE	3
1.1.2 Mechanická koncepce LCE-02	3
1.2 Cíle práce	4
2 Přenos řídicího systému LCE z desky dSpace DS1103 na dSpace MicroAutoBox	6
2.1 Výkonné jádro řídicího systému LCE	6
2.2 Průmyslový počítač	7
2.3 MicroAutoBox	8
2.4 Přenos řídicího systému	10
2.4.1 Senzor polohy	10
2.4.2 Převod řízení elektrického motorgenerátoru	11
2.4.3 Převod řízení spalovací části	12
2.5 Oživení systému	12
3 Nová koncepce lineárního motorgenerátoru	14
3.1 Popis nové koncepce	14
3.2 Příklad provedení technického řešení	18
3.3 Simulační model	20

3.3.1	Model mechanické části	20
3.3.2	Model termodynamické části	22
3.3.3	Model elektrické části lineárního motoru	22
3.3.4	Celkový model nové koncepce LCE	25
3.4	Řídicí systém	27
3.4.1	Proudový regulátor	27
3.4.2	Řízení množství vstříknutého paliva	27
3.4.3	Řízení zapalování	29
3.4.4	Řízení síly lineárního motorgenerátoru	29
3.4.5	ControlDesk	32
3.4.6	Celkové simulační schéma	33
3.5	Shrnutí výsledků simulací	34
4	Závěr	36
Literatura		38
A	ControlDesk – řízení LCE	I
B	ControlDesk – simulace nové koncepce	V
C	Simulace nové koncepce – rozběh motoru	IX
D	Simulace nové koncepce – brzdění motoru elektrickým motorgenerátorem	XII
E	Simulace nové koncepce – příklad poruchy – nestálá tuhost pružiny	XV

Seznam obrázků

1.1	Uspořádání testovacího pracoviště LCE-01	2
1.2	Uspořádání testovacího pracoviště LCE-02	2
1.3	Pracovní cyklus LCE	5
2.1	Možnosti systému dSpace ve spojení se Simulinkem a ControlDeskem	7
2.2	Průmyslový počítač s deskou dSpace DS1103 a propojovací a přizpůsobovací modul	7
2.3	Blokové schéma desky dSpace DS1103	8
2.4	MicroAutoBox s propojovacím a přizpůsobovacím modulem	9
2.5	Blokové schéma MicroAutoBoxu 1401	9
2.6	Navázání řízení elektrické části na hardware MicroAutoBoxu	11
2.7	Navázání řízení spalovací části na hardware MicroAutoBoxu	12
2.8	Ilustrace chyby „task overrun“	13
3.1	Princip nové koncepce motoru s volnými písty	16
3.2	Definice veličin modelu podle nové koncepce	20
3.3	Schéma mechanické části	22
3.4	Schéma termodynamické části	23
3.5	Elektrické schéma motoru se zdrojem napětí	23
3.6	Elementární obvod jedné části zdroje a motoru	24
3.7	Schéma elektrické části lineárního motoru	25
3.8	Celkový model nové koncepce LCE	26
3.9	Schéma proudového regulátoru	28
3.10	Řízení přípravy paliva	28
3.11	Řízení zapalování	29

3.12	Řízení síly lineárního motorgenerátoru	30
3.13	Logika startu a brzdění	31
3.14	Regulátor startovací síly	31
3.15	Regulátory řízeného brzdění a bezpečnostního zastavení	31
3.16	Výstup pro vizualizaci a řízení v aplikaci ControlDesk	32
3.17	Celkové simulační schéma	33
A.1	ControlDesk – Regulace na danou sinusovku	II
A.2	ControlDesk – Regulace na přesnou polohu	III
A.3	ControlDesk – Řízení spalovací části	IV
B.1	ControlDesk – řídicí panel	VI
B.2	ControlDesk – vizualizace průběhů	VII
B.3	ControlDesk – nastavení mechanických vlastností	VIII
C.1	Amplituda vzájemné polohy pístů	X
C.2	Amplituda vzájemné rychlosti pístů	X
C.3	Rozběhová síla	XI
C.4	Čas přípravy paliva	XI
D.1	Amplituda vzájemné polohy pístů	XIII
D.2	Amplituda vzájemné rychlosti pístů	XIII
D.3	Brzdící síla	XIV
D.4	Čas přípravy paliva	XIV
E.1	Amplituda vzájemné polohy pístů	XVI
E.2	Amplituda vzájemné rychlosti pístů	XVI
E.3	Tuhost pružiny k_{P1}	XVII
E.4	Čas přípravy paliva	XVII

Seznam tabulek

2.1 Zapojení pinů snímače polohy	10
3.1 Legenda k obr. 3.1	17
3.2 Seznam konstant mechanické části	34

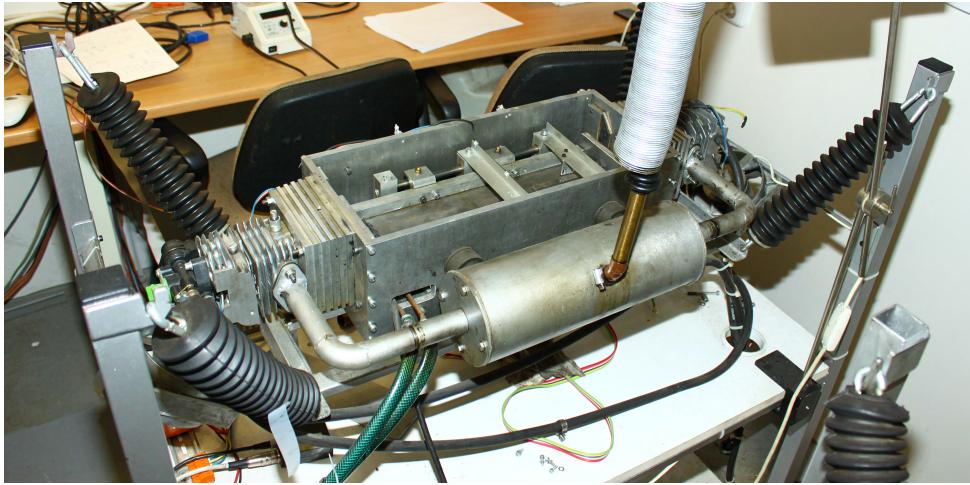
Kapitola 1

Úvod

Očekává se, že celková spotřeba energie ve světě se do roku 2050 zdvojnásobí. Fosilní paliva (uhlí, ropa a zemní plyn) poskytují 70 %, nefosilní zdroje (obnovitelná a jaderná energie) 30 % celkové spotřeby. Ceny fosilních paliv ale neustále rostou, což odráží vzrůstající nedostatek těchto zdrojů. Řešení této situace se dá rozdělit do dvou strategií: rozvoj alternativních a obnovitelných zdrojů energie a zlepšování energetické účinnosti. Projekt LCE (Linear Combustion Engine – lineární spalovací motor) se snaží obě strategie zkombinovat. Jeho cílem je konstrukce generátoru elektrické energie, který bude mít zvýšenou účinnost oproti stávajícím zařízením a zároveň umožní použití alternativních paliv. Tento generátor se obecně v literatuře označuje jako „free piston engine“, tedy motor s volnými písty. Píst je „volný“, protože jeho pohyb není omezen definovanou horní úvratí klikového hřídele tak, jak tomu je u konvenčních rotačních motorů. Délka zdvihu pístu je proměnná a je dána pouze interakcí sil, které na píst působí.

1.1 LCE

Projekt LCE má za sebou již poměrně dlouhou historii, jejíž podrobný aktuální přehled lze najít např. v [5] a v [6]. V rámci tohoto projektu byly zkonstruovány dva funkční modely lineárního spalovacího motoru. Prvním experimentálním funkčním modelem byl LCE-01 (viz obr. 1.1, detailní popis viz [8]), jehož cílem bylo ověření pozitivních výsledků provedených simulací. Na tomto funkčním modelu se podařilo dosáhnout ustáleného chodu spalovacího motoru s volnými písty a získat i určitý výstupní elektrický výkon.



Obrázek 1.1: Uspořádání testovacího pracoviště LCE-01

Na základě provozu prvního funkčního modelu byla navržena konstrukce funkčního modelu LCE-02 (viz obr. 1.2, detailní popis viz [6]), který měl odstranit některé mechanické nedostatky a zvýšit možný výstupní výkon motoru. LCE-02 disponuje kompaktnější konstrukcí, kde je na hlavní tělo motoru umístěno chlazení, palivový okruh, rozvod tlakového vzduchu a výfukový systém. LCE-01 měl chlazení vzduchem, zatímco LCE-02 již disponuje vodním chlazením s dvěma nezávislými okruhy. První chladící okruh je použit na chlazení spalovací části s pracovní teplotou $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ a druhý chladící okruh je použit na chlazení lineárního elektrického motoru, jehož pracovní teplota je $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ([5]).



Obrázek 1.2: Uspořádání testovacího pracoviště LCE-02

LCE je stroj pracující jako dvoutaktní zážehový motor. Základní konstrukce je tvořena lineárním motor-generátorem a dvěma protilehlými písty. Tyto prvky jsou uspořádány v jedné linii, motor tedy vykonává pouze lineární pohyb. Výhodou tohoto uspořádání je mechanická jednoduchost, umožňující dlouhou životnost mechanických částí. Motor nemá žádný mechanický výstupní hřídel, jeho výstupem je přímo elektrická energie.

1.1.1 Pracovní cyklus LCE

Jako výchozí stav předpokládám situaci, kdy právě došlo k zapálení směsi v levém válci (viz obr. 1.3(a)). Uvolněná energie akceleruje pohyblivou část motoru směrem k protilehlému válci, kde během tohoto pohybu dochází ke kompresi nasátého vzduchu. Ve vhodném okamžiku dojde ke vstřiku a vytvoří se tak palivová směs. V určitém okamžiku také dojde k otevření výfukového kanálu v levém válci a spálená směs může tedy opustit spalovací prostor (viz obr. 1.3(b)). Část energie získané expanzí se spotřebuje na stlačení směsi v protilehlém válci a dále na pokrytí mechanických ztrát a na energii nutnou pro výměnu pracovní náplně válce. Rozdíl mezi těmito energiami je odveden prostřednictvím řízeného odběru přes lineární motorgenerátor ve formě elektrické energie. Směs připravená a stlačená v pravém válci je zapálena (viz obr. 1.3(c)) a celý děj se periodicky opakuje (viz obr. 1.3(d)). Řízení odběru z lineárního motorgenerátoru musí být velmi přesné a rotor je nutno zastavit v přesně definované poloze, aby byla zajištěna daná komprese. Při spouštění LCE a v případě vynechání zápalu směsi se lineární motorgenerátor přepne do motorického režimu a využije se akumulované energie. Více podrobností o principu činnosti LCE lze najít v [1], [6] a [8].

1.1.2 Mechanická koncepce LCE-02

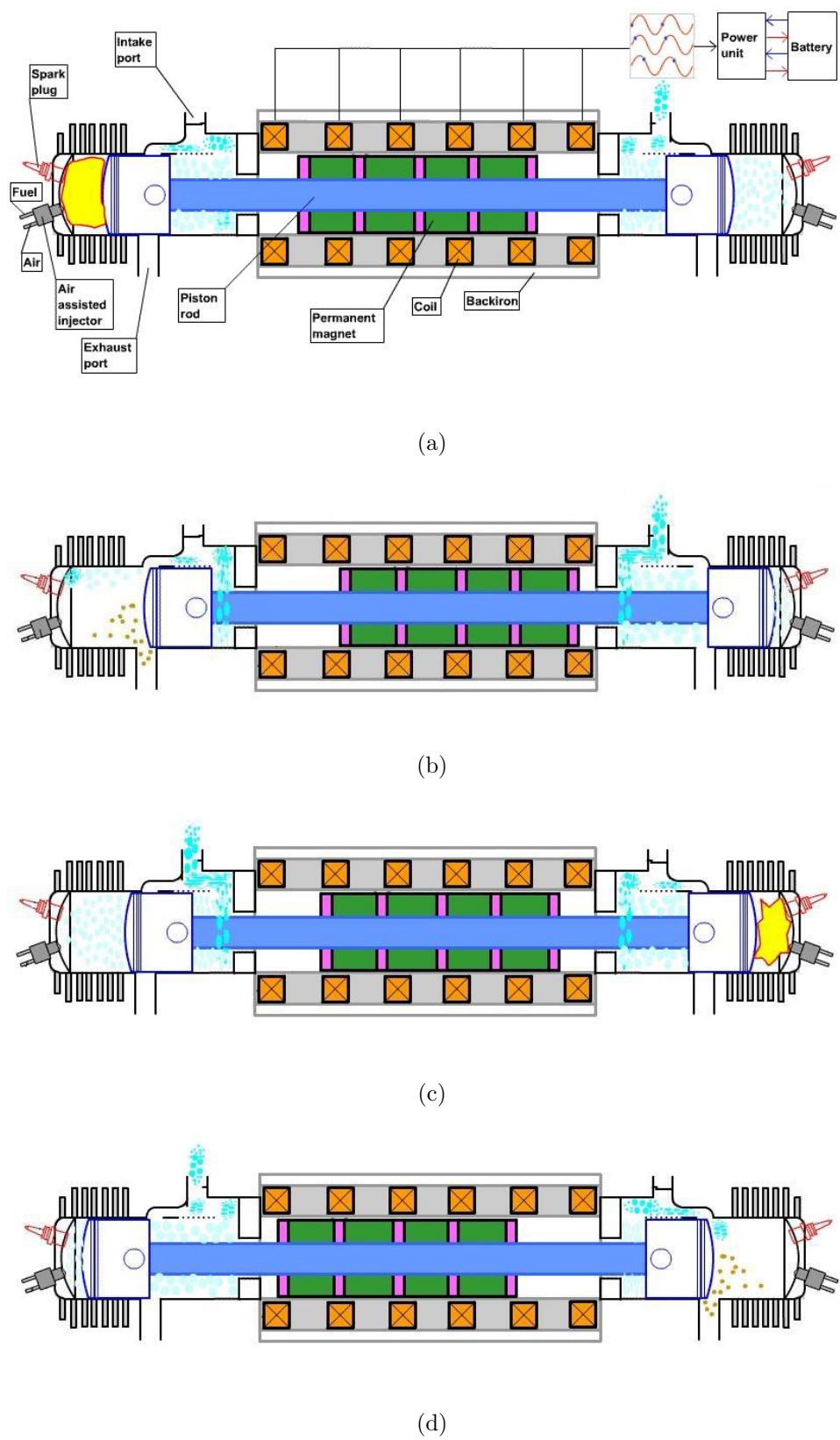
Základ konstrukce tvoří robustní duralový rám, ve kterém jsou umístěny dva statory lineárního vodou chlazeného motoru typu L3SK075P-2415 od firmy VUES Brno. Jako rotor je použit duralový rámeček, který ve své střední části obsahuje jednu vrstvu permanentních magnetů, překrytých pouze 0,6 mm silnou vrstvou laminátu. Koncepce rotoru pohybujícího se mezi dvěma statory byla zvolena proto, že tím dojde k eliminaci sil, které působí na lineární ložiska použitá pro vedení rotoru, je tím docíleno většího celkového

výkonu a je možné významně snížit hmotnost pohyblivé části. Na protilehlých čelech duralového rámu jsou umístěny 2 válce o objemu 2×50 ccm z motocyklu Aprilia SR50. V nich se pohybují dva písty, propojené pístními tyčemi s rotem. Do hlav válců je namontován elektricky řízený systém přímého vstřikování DiTech od firmy Orbital Engine Company ([6]).

V roce 2009 došlo k modernizaci mechanické koncepce LCE-02. Mezi stator a rotor byly vloženy 4 pružiny, které definují klidový stav rotoru ve středové poloze. LCE-02 je od té doby označován jako LCE-02P. Všechny 4 pružiny mají lineární závislost síly na poloze a jsou ve středové poloze rotoru předepjaty ([5]).

1.2 Cíle práce

Na základě konzultací s vedoucím práce byly stanoveny následující cíle práce: Prvním cílem je oživení řídícího systému LCE na nové platformě dSpace MicroAutoBox. To vyžaduje seznámení se s principem řízení funkčního vzorku lineárního spalovacího motoru LCE-02P, a dále úpravu a přenesení řídicího systému motoru na novou platformu dSpace Microautobox. Druhým cílem této práce je návrh simulačního modelu nové koncepce motoru s volnými písty podle [9] a stanovení podmínek, za kterých by tato koncepce motoru přinesla zvýšení výkonové hustoty a dalších parametrů motoru. K tomu je nutné upravit simulaci pro nástroj dSpace ControlDesk pro snadné zadávání změny parametrů vybraných podsystémů motoru, což umožní testování simulačního modelu v různých pracovních bodech.



Obrázek 1.3: Pracovní cyklus LCE - převzato z [6])

Kapitola 2

Přenos řídicího systému LCE z desky dSpace DS1103 na dSpace MicroAutoBox

V této kapitole bude popsán postup přechodu z původního řídicího průmyslového počítače od firmy Humusoft na řízení platformou MicroAutoBox. Vycházel jsem z bakalářské [4] a diplomové práce [5] Tomáše Hauberta, který v ní navrhl interface a řídicí systém elektrické části LCE pro MicroAutoBox.

2.1 Výkonné jádro řídicího systému LCE

Vzhledem k vysokým nárokům na výpočetní výkon řídicího systému byl od počátku projektu používám systém od firmy dSpace, který umožňuje řízení i simulaci v reálném čase. Obrovskou výhodou je možnost přímého generování kódu z prostředí Matlab Simulink [2]. Díky tomu je možné algoritmy navržené a otestované v prostředí Simulink použít přímo i pro řízení reálné soustavy. Nejedná se ale o využití PC pro řízení, což by vzhledem k nárokům na časově kritické zpracování informací v reálném čase ani nebylo možné, ale o reálný HW s výkonným 32-bitovým mikrokontrolérem. Blokové schéma, vytvořené v Simulinku, je nejprve převedeno do jazyka C a poté je kód zkompilován pro cílovou platformu [2]. Po nahrání výsledného kódu do HW dSpace běží celý algoritmus na této platformě a PC již není pro řízení potřeba. Zároveň je ale zachována možnost se z PC

k tomuto HW připojit a sledovat, případně zaznamenávat libovolné veličiny v reálném čase. K tomu slouží program ControlDesk (viz obr. 2.1) [6].



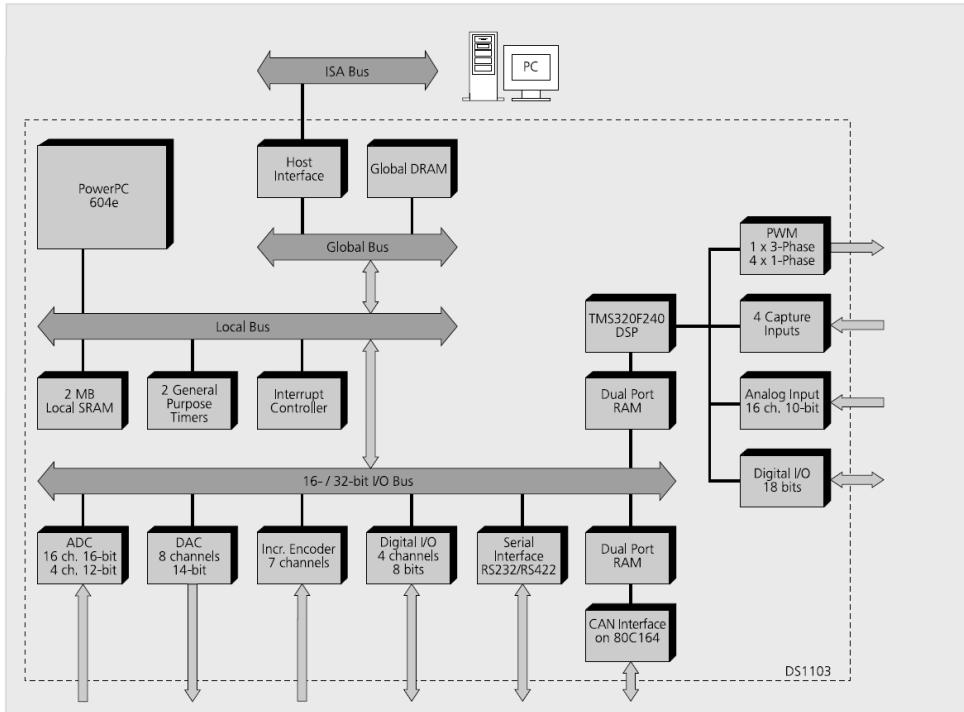
Obrázek 2.1: Možnosti systému dSpace ve spojení se Simulinkem a ControlDeskem – převzato z [2]

2.2 Průmyslový počítač

V počáteční fázi projektu byla pro řízení použita výkonná deska dSpace DS1103, nainstalovaná v průmyslovém PC (viz obr. 2.2). Blokové schéma této desky je na obr. 2.3. Hlavní nevýhodou tohoto systému je nutnost instalovat desku do PC (navíc do zastaralé sběrnice ISA). Tím se značně komplikovala i kabeláž, protože k PC musela být připojena speciální propojovací deska, a teprve k ní pak samotná technologie (viz obr. 2.2). Řídicí systém tak není možné spojit v jeden kompaktní celek s funkčním vzorkem LCE.



Obrázek 2.2: Průmyslový počítač s deskou dSpace DS1103 a propojovací a přizpůsobovací modul



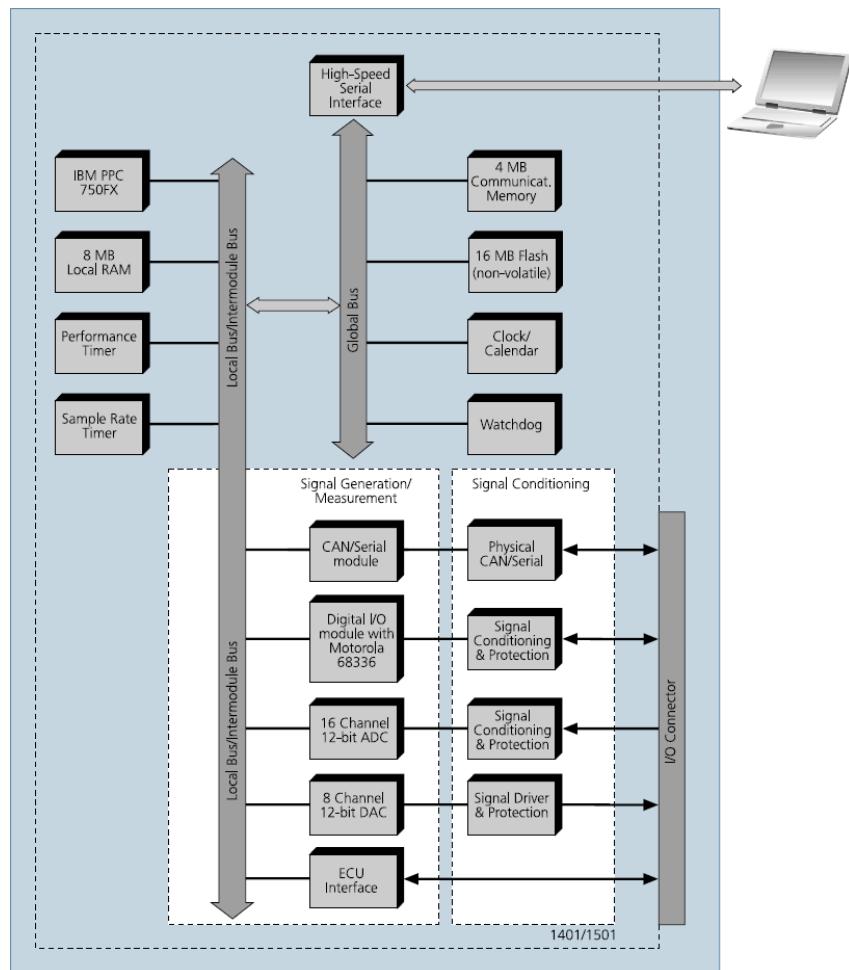
Obrázek 2.3: Blokové schéma desky dSpace DS1103 – převzato z [2]

2.3 MicroAutoBox

MicroAutoBox je kompaktní nezávislá řídicí jednotka, která se využívá k vývoji, testování a optimalizaci řídicích algoritmů v reálném čase. Jeho robustní a kompaktní design je navržen pro instalaci do automobilů, celá jednotka se nachází v hliníkovém boxu odolnému nepříznivému prostředí s rozsahem operačních teplot od -40°C do $+80^{\circ}\text{C}$. S PC je propojen pouze speciálním vysokorychlostním kabelem pro nahraní zkompilovaného kódu a PC pro svoji funkci dále nepotřebuje. Zůstává ale zachována možnost PC k MicroAutoBox připojit a sledovat, zaznamenávat a případně i řídit libovolné veličiny v reálném čase. V rámci bakalářské práce ing. Tomáše Hauberta [4] vzniknul propojovací a přizpůsobovací modul a bylo otestováno jeho propojení s LCE. Modul v sobě integruje vše potřebné pro přizpůsobení akčních veličin a senzorů pro přímé propojení k jednotce MicroAutoBox (viz obr. 2.4). Blokové schéma MicroAutoBoxu je na obr. 2.5.



Obrázek 2.4: MicroAutoBox s propojovacím a přizpůsobovacím modulem



Obrázek 2.5: Blokové schéma MicroAutoBoxu 1401 – převzato z [2]

2.4 Přenos řídicího systému

Přenos řídicího systému jsem rozdělil do tří sekcí. První sekce se věnuje senzoru polohy, který je pro řídicí systém LCE velmi kritický. Druhá sekce se zabývá převodem řídicího systému elektrického motorgenerátoru a třetí sekce řeší převod řízení spalování motoru.

2.4.1 Senzor polohy

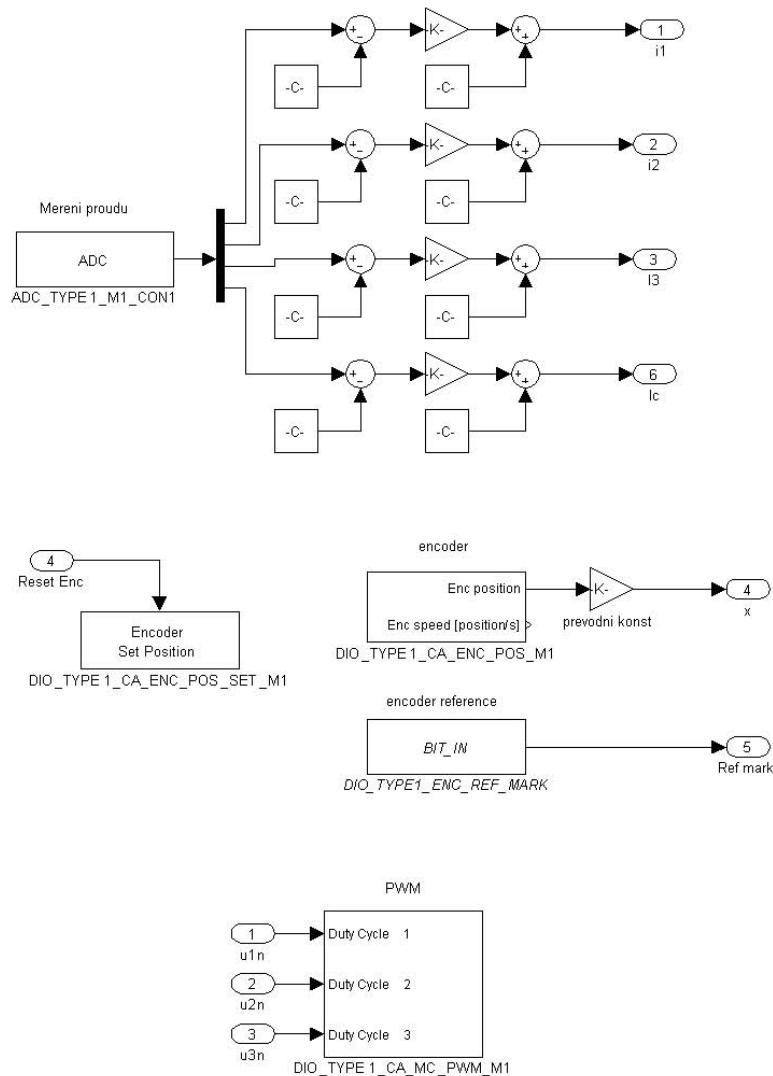
V motoru LCE02P byl původně použit inkrementální snímač polohy Limes L2 od firmy Kübler (popis viz [6]). Tento senzor ale nevykazoval dobré vlastnosti a jeho výstup byl čím dál tím více poruchovější, proto byl do motoru LCE-02P zabudován i původní snímač ELGO MIX1 z motoru LCE-01 (popis viz [8]). Použití starého snímače znamená z důvodu odlišného rozlišení nutnost změny převodní konstanty v simulinkovém modelu (Limes L2 – **10000**, ELGO – **25000**). Interface MicroAutoBoxu bylo navrženo pro snímač Limes L2, proto bylo také nutno vyrobit redukci z D-SUB konektoru interface MicroAutoBoxu na DIN konektor senzoru ELGO (viz tab. 2.1).

(a) D-SUB konektor interface MicroAutoBoxu		(b) DIN konektor senzoru ELGO MIX1	
1	+5V	1	GND
2	—	2	+5V
3	—	3	A IRCA (<i>A</i>)
4	GND	4	A IRCB (<i>B</i>)
5	—	5	—
6	B IRCB (\bar{B})	6	B IRCA (\bar{A})
7	B IRCA (\bar{A})	7	B IRCB (\bar{B})
8	A IRCB (<i>B</i>)	8	—
9	A IRCA (<i>A</i>)		

Tabulka 2.1: Zapojení pinů snímače polohy

2.4.2 Převod řízení elektrického motorgenerátoru

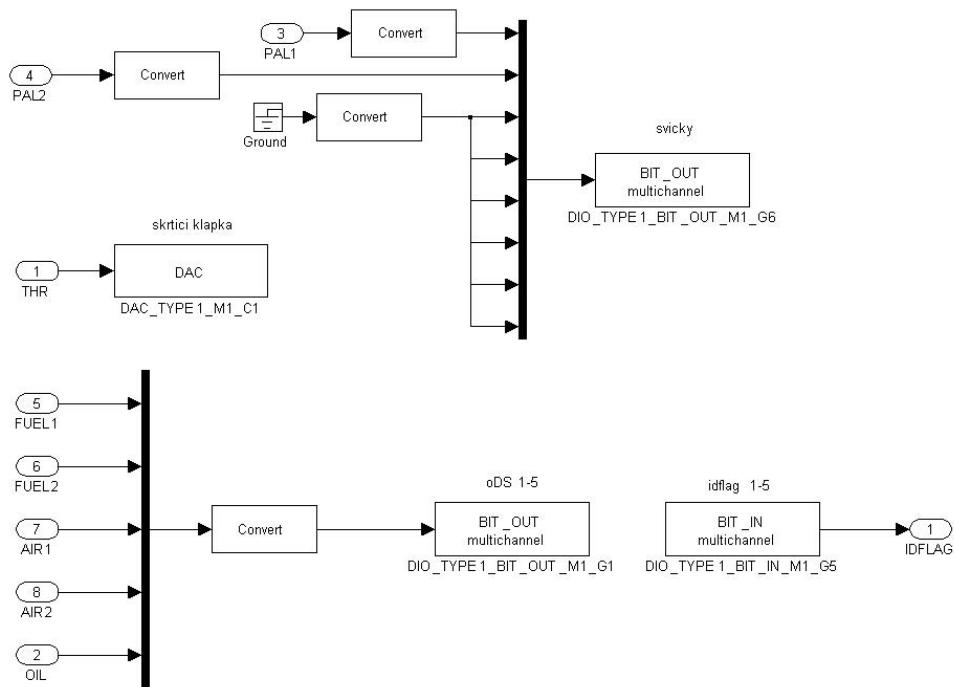
Díky použití systému dSpace ControlDesk je samotný přenos řídicích algoritmů velmi jednoduchý proces. Vizualizace v aplikaci ControlDesk jsou napříč různými verzemi kompatibilní. Zbývá tedy vyřešit pouze model v prostředí Simulink, ze kterého ControlDesk vychází. Model jsem aktualizoval pro novější verzi programu Matlab, který běží na počítači určeném k obsluze MicroAutoBoxu. Dále jsem upravil navázání na hardware, které je pro MicroAutoBox odlišné od desky dSpace DS1103, viz obr. 2.6. V tom jsem vycházel z [5], kde již bylo navázání na hardware vyřešeno. Ukázka vizualizace řízení elektrického motorgenerátoru v prostředí ControlDesk je v příloze A.1 a A.2.



Obrázek 2.6: Navázání řízení elektrické části na hardware MicroAutoBoxu

2.4.3 Převod řízení spalovací části

MicroAutoBox byl dosud používán pouze pro řízení elektrického motorgenerátoru ([5]). Proto bylo potřeba vyřešit kompletní navázání veličin řízení spalování na hardware MicroAutoBoxu. Z výstupů desky interface [4] a jejich zapojení do ZIF konektoru MicroAutoBoxu jsem určil jednotlivé funkční bloky, potřebné k ovládání spalovací části (viz obr. 2.7). Ukázka vizualizace řízení spalovací části v prostředí ControlDesk je v příloze A.3.

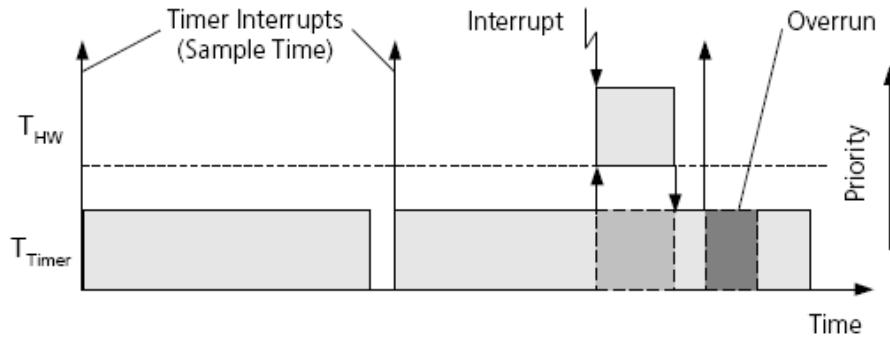


Obrázek 2.7: Navázání řízení spalovací části na hardware MicroAutoBoxu

2.5 Oživení systému

Po těchto krocích by již nic nemělo bránit spuštění, přesto po nahrání aplikace do MicroAutoBoxu a spuštění na real-time procesoru dojde okamžitě k ukončení chodu vlivem chyby „task overrun“. Podle [2] k této chybě dojde v případě, kdy je příliš krátká vzorkovací perioda. Model LCE je nastaven pro vzorkovací periodu 0.0001 s . Real-time interface (RTI), sloužící k real-time propojení simulinkového modelu s dSpace hardwarem, po komplikaci a přenesení modelu do MicroAutoBoxu spustí časovač, který periodicky (podle vzorkovací periody) spouští tzv. „task“ – čtení vstupů, výpočet potřebných hodnot a zápis výstupů. Celý model LCE se spouští jako jeden „task“. Pokud přijde požadavek na

nové spuštění „tasku“ který ještě nedoběhl, dojde k chybě „task overrun“ (viz obr. 2.8). S diagnostikou této chyby mi pomáhal pan Jiří Sehnal, odborník na systémy dSpace a zaměstnanec firmy HUMUSOFT (výhradní distributor dSpace v České republice).



Obrázek 2.8: Ilustrace chyby „task overrun“ – převzato z [2]

ControlDesk dokáže real-time zobrazit dobu běhu jednoho spuštění „tasku“, tzv. „task turnaround time“. Pro diagnostiku chyby jsem nejprve celý model spustil na původní desce dSpace DS1103 a zobrazil „task turnaround time“, který byl přibližně 0.00001 s, tedy desetkrát menší než vzorkovací perioda.

Po zvýšení vzorkovací periody na 0.001 s se již podařilo model spustit i na MicroAutoBoxu, a „task turnaround time“ byl v tomto případě přibližně 0.00013 s. Toto je vyšší hodnota než původní vzorkovací perioda, a proto při použití původní vzorkovací periody dochází k chybě „task overrun“. Důvodem vyššího „task turnaround time“ u mnohem modernějšího MicroAutoBoxu je rozdíl v hardwarové architektuře, konkrétně ve zpracování údajů z inkrementálního senzoru polohy. Zatímco deska DS1103 má inkrementální enkodéry přímo na 32-bitové vnitřní datové sběrnici master procesoru (viz obr. 2.3), MicroAutoBox je má na slave procesoru Motorola MC68336 (viz obr. 2.5). Mezi stupeň komunikace mezi slave procesorem Motorola MC68336 a master procesorem IBM PPC 750FX v tomto případě způsobí výrazné zvýšení doby zpracování.

Simulinkový model jsem tedy upravil pro funkci s vyšší vzorkovací periodou. Následně jsem úspěšně otestoval řízení elektrického motorgenerátoru na funkčním vzorku LCE-02P. Řízení spalovací části vzhledem k závadě na jednom z pístů bohužel nebylo možné vyzkoušet na funkčním vzorku, správnou funkci řídicího systému jsem otestoval alespoň pomocí digitálního osciloskopu.

Kapitola 3

Nová koncepce lineárního motorgenerátoru

V této kapitole bude popsána nová mechanická koncepce lineárního motorgenerátoru a tvorba simulačního modelu této koncepce. Následně bude popsán postup tvorby řídicího systému a podle výsledků simulací zhodnoceny dosažitelné možnosti nové koncepce. Idea nové koncepce vychází z patentu [9] Ondřeje Vysokého.

3.1 Popis nové koncepce

Na základě teoretických i experimentálních výsledků s motory LCE-01 a LCE-02 byly stanoveny meze možností motorů s tímto kinematickým principem. Tyto meze se snaží překonat nová koncepce lineárního motorgenerátoru s volnými písty podle [9] naznačená na obr. 3.1. Podstatou nového motorgenerátoru je to, že je tvořen alespoň dvěma válci s hlavami a písty propojenými s pístními tyčemi. K jedné pístní tyči je připojen rotor a k druhé pístní tyči je připojen stator pro zajištění magnetické vazby mezi rotorem a statorem. Stator je opatřen výstupními svorkami a konce pístních tyčí jsou opatřeny pružinami.

Hlavy dvoutaktních spalovacích motorů jsou v případě zážehové verze stroje s výhodou opatřeny zapalovacími svíčkami a tlakovými elektronickými vstřikovači plynného nebo kapalného paliva. U vznětové verze stroje jsou v hlavách tlakové vstřikovače nafty a veškeré další elementy pro zajištění optimálního spalování. Na sacím potrubí může být

umístěno turbodmychadlo propojené s elektromotorem spojeným s řídící jednotkou a přívodní větve sacího potrubí k hlavám motoru jsou s výhodou opatřeny jazýčkovými ventily. Na vstupu výfukového potrubí je ve výhodném provedení připojena turbína a propojena s elektrickým generátorem. Pružiny mohou být mechanické nebo pneumatické nebo hydraulické nebo různě kombinované z uvedených možností.

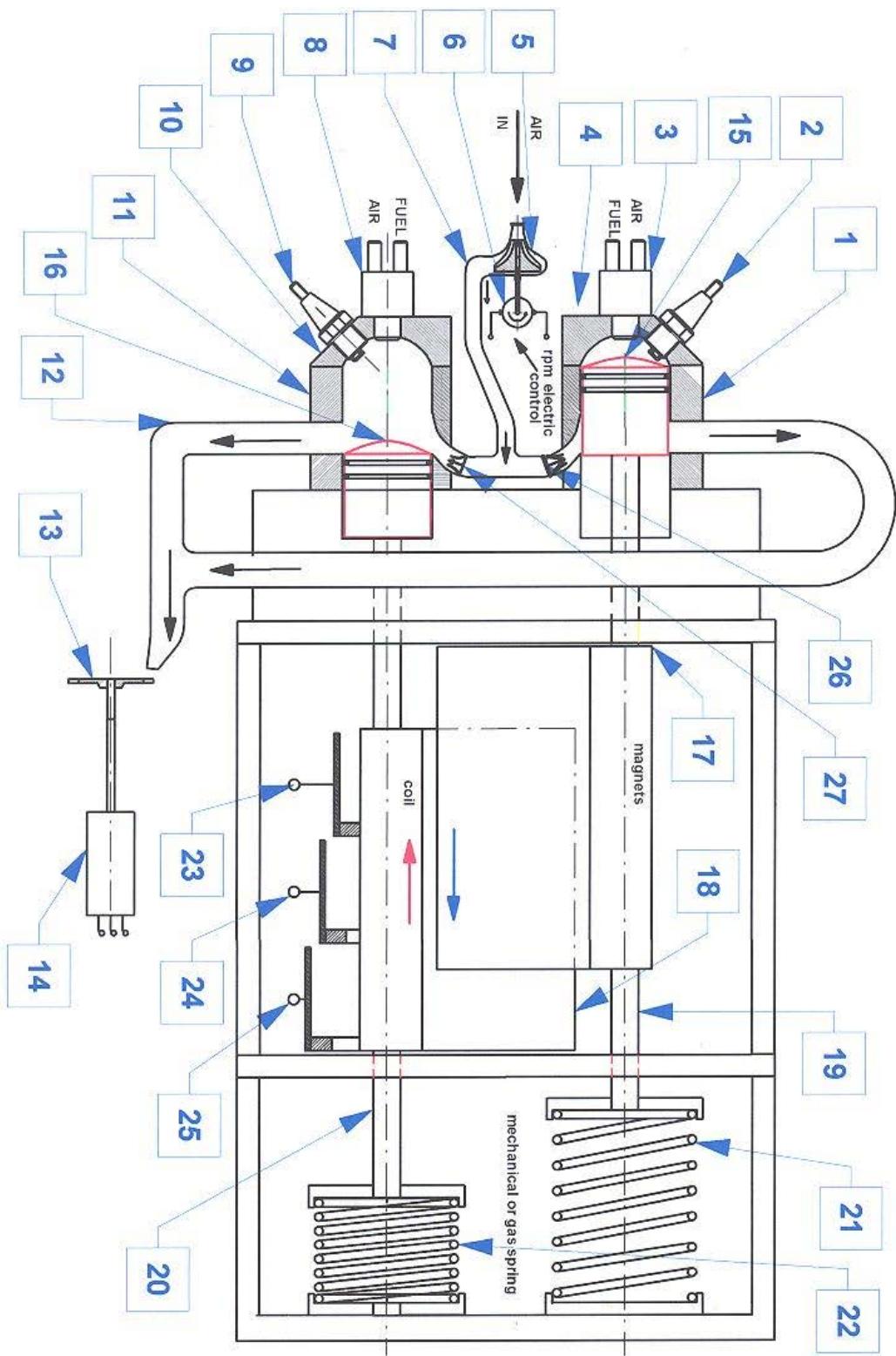
Společný blok válců pouze na jedné straně motoru technologicky zjednoduší systémy chlazení, výfukový systém, systém sání a kabeláž. Takové řešení zvyšuje i výkonovou hustotu celého stroje. Vyplachování válců nezávislým dmychadlem poháněným elektromotorem zlepšuje plnění válců a umožňuje přechod na přeplňovaný mód práce motoru s jednoduchým a přesným řízením plnění válců. To vede ke zvyšování výkonu a účinnosti motoru.

Nová konfigurace lineárního motorgenerátoru předpokládá, že rotorová část motoru, tj. magnety, je součástí jedné pístní tyče a statorová část, tj. cívky, je součástí druhé pístní tyče sousedního pístu. Při stejných hmotách obou částí motoru a protiběžného pohybu obou pístů je vzájemná rychlosť rotoru a statoru dvojnásobná. Výsledkem je možnost zásadního snížení hmoty celého lineárního motoru při zachování původního výkonu.

Časování rozvodu motoru je technickými prostředky navrženo tak, aby zbytková kinetická energie expandujících výfukových plynů byla využita výfukovou turbinou. Turbina je spojena s elektrickým generátorem, který vyrobenou energii využívá především pro hrazení výkonu elektrického turbodmychadla a dále může být doplňkovým výkonem hlavního, lineárního generátoru. Výhodou tohoto uspořádání je snadné řízení tohoto přídavného výkonu na elektrické straně.

Uvedené řešení zvyšuje výkonové parametry motoru s volnými písty, zvyšuje hustotu výkonu, termodynamickou účinnost stroje a současně umožňuje zjednodušení mechanické sestavy stroje. Pružinový systém a hmota pohyblivé části určují kmitočet mechanické rezonance systému, při které stroj pracuje. Zásadní výhodou práce pouze v jednom pracovním bodě při mechanické rezonanci je možnost dokonale optimalizovat spalovací proces, jehož důsledkem je vyšší termodynamická účinnost. Proto se předpokládá automatické vypínání motoru při nízkém odběru energie a kooperace s dalšími zdroji energie, například na palubě vozidla.

HIGH EFFICIENCY MOTOR-GENERATOR WITH FREE PISTON ENGINE



Obrázek 3.1: Princip nové koncepce motoru s volnými písty se zvýšením měrného výkonu a účinnosti – převzato z [9]

1.	Válec
2.	Zapalovací svíčka
3.	Injecteur pro přímý vstřik paliva do válců s pomocí stlačeného vzduchu
4.	Hlava válce
5.	Turbodmychadlo
6.	Elektrický motor pevně spojen s turbodmychadlem
7.	Sací potrubí
8.	Injecteur pro přímý vstřik paliva do válců s pomocí stlačeného vzduchu
9.	Zapalovací svíčka
10.	Hlava válce
11.	Válec
12.	Výfukové potrubí
13.	Turbina na výfukové plyny
14.	Elektrický generátor napojený na turbinu (13)
15.	Píst motoru
16.	Píst motoru
17.	Rotor elektrického lineárního motorgenerátoru (magnety)
18.	Stator elektrického lineárního motorgenerátoru (cívky)
19.	Pístní tyč
20.	Pístní tyč
21.	Pružina (mechanická nebo pneumatická)
22.	Pružina (mechanická nebo pneumatická)
23.	Posuvný přívod motorgenerátoru
24.	Posuvný přívod motorgenerátoru
25.	Posuvný přívod motorgenerátoru
26.	Jazýčkový ventil pro řízení sání
27.	Jazýčkový ventil pro řízení sání

Tabulka 3.1: Legenda k obr. 3.1 – převzato z [9]

3.2 Příklad provedení technického řešení

Zážehová verze lineárního motorgenerátoru s volnými písty **15, 16** je tvořena dvěma válci **1, 11** s hlavami **4, 10** a s písty **15, 16**, propojenými s pístní tyčí **19, 20**. K jedné pístní tyči **19** je připojen rotor **17** a k druhé pístní tyči **20** je připojen stator **18** pro vytvoření magnetické vazby mezi rotorem **17** a statorem **18**. Stator **18** je opatřen výstupními svorkami **23, 24, 25** a konce pístních tyčí **19, 20** jsou opatřeny mechanickými pružinami **21, 22**. Hlavy **4, 10** dvoutaktních spalovacích motorů jsou opatřeny zapalovacími svíčkami **2, 9** a tlakovými elektronickými vstřikovači **3, 8** paliva.

Na sacím potrubí **7** je umístěno turbodmychadlo **5** propojené s elektromotorem **6** spojeným s řídící jednotkou a přívodní větve sacího potrubí **7** k hlavám **4, 10** motoru jsou opatřeny jazýčkovými ventily **26, 27**. K výfukovému potrubí **15** je připojena turbína **13** připojená k elektrickému generátoru **14**.

Základem řešení jsou tedy dva válce **1, 11** s písty **15, 16** vedle sebe. Každý píst **15, 16** je pístní tyčí **19, 20** spojen s jednou částí lineárního motorgenerátoru a současně s pružinovým systémem s pružinami **21, 22**, zajišťujícím operace v okolí mechanické rezonance systému. Na jedné pístní tyči **19** je umístěn rotor **17** lineárního generátoru a na druhé pístní tyči **20** je umístěn stator **18**, obsahující systém cívek s přívodními svorkami **23, 24, 25**. Konstrukce je navržena tak, aby obě části motoru měly stejnou hmotu pro zajištění identické rezonanční frekvence. Pohyb obou pístních tyčí **19, 20** je protiběžný a vzájemná rychlosť obou částí motoru je dvakrát vyšší než pístová rychlosť každého pístu **15, 16**. Využitím tohoto řešení lze navrhnout elektrickou část stroje s výrazně sníženou hmotností. Současně jsou i menší problémy s vibracemi celého stroje v porovnání s klasickou koncepcí podle obr. 1.3.

Základní termodynamický cyklus je dvoutaktní. Tradiční nevýhody tohoto termodynamického oběhu, tj. špatné vyplachování a únik nové směsi do výfukového systému, jsou vyřešeny tlakovým vstřikováním paliva do spalovacího prostoru s použitím stlačeného vzduchu. S tímto zařízením lze dosáhnout podobných exhalačních parametrů jako u čtyrtaktního motoru. Vyplachování je řešeno nezávislým turbodmychadlem **5**, poháněným elektrickým motorem **6**. Hmotnostní podíl vzduchu, který se po uzavření rozvodových kanálů ve válci **1, 11** komprimuje, je nelineární funkcí otáček elektrického motoru **6** turbodmychadla

5. Řízení požadovaného výkonu stroje lze při tomto uspořádání zajistit regulací otáček elektrického motoru **6** turbodmychadla **5**.

Zbytková kinetická energie výfukových plynů je předána turbině **13** ve výfukovém potrubí **12**. Turbina **13** je spojena s vysokootáčkovým elektrickým generátorem **14**. Výstupní výkon tohoto generátoru **14** především hradí výkon elektrického turbodmychadla **5** a další eventuální výkon se připojuje k elektrickému výstupu celého stroje.

Proti každému pístu **15**, **16** je na opačné straně pístní tyče **19**, **20** pružina **21**, **22**, která může být mechanická nebo pneumatická. Její charakteristika je navržena tak, aby při dané hmotě pohyblivé části – píst **15**, **16**, pístní tyč **19**, **20**, pohyblivá část generátoru **14**, byla vytvořena kmitavá soustava, jejíž rezonanční frekvence odpovídá požadované pracovní frekvenci stroje. Oba písty **15**, **16** pracují v protiběžném režimu. Základní synchronizace obou pístů **15**, **16** je zajištěna počáteční polohou pístů **15**, **16** v okamžiku startu, tj. oba písty **15**, **16** jsou v horní úvratí, kdy lineární generátor **14** pracuje v motorovém režimu. Po dosažení požadované amplitudy kmitů je přesná synchronizace zajištěna řídicím systémem. Ten určuje dávku paliva pro každý píst **15**, **16** a okamžik zážehu v konkrétním termodynamickém cyklu. Magnetická vazba mezi rotem **17** a statorem **18** při protiběžném pohybu pístů **15**, **16** disponuje s dvojnásobnou rychlostí proti rychlosti pístové, což způsobuje výrazné snížení rozměrů a hmoty celého lineárního motorgenerátoru, pokud se zajistí stejné hmoty rotoru **17** i statoru **18** a použijí se stejné mechanické nebo pneumatické pružiny **21**, **22**. Tím vzniká kmitavá soustava, pracující v oblasti své rezonanční frekvence, kde je v rovnováze přírůstek energie dodané systému shořením dávky paliva v každém cyklu a odvodem elektrické energie do zátěže přes výstupní svorky **23**, **24**, **25**, přitom energie stlačené pružiny **21** zajistí zpětný pohyb pístní tyče **19** a pístu **15** ve fázi komprese, současně probíhá vyplachování výfukových plynů z předchozího cyklu a náplň nového odměřeného množství vzduchu pro nový cyklus a to zajistuje turbodmychadlo **5**, kterým otáčí elektrický motor **6** a jehož otáčky jsou řízeny řídicí jednotkou tak, aby se zajistil přesný požadovaný poměr palivo/vzduch v následujícím cyklu a rozdělení, do kterého válce **1**, **11** se nová dávka vzduchu dostane se zajistí jazýčkovými ventily **26**, **27**, umístěnými v sacím potrubí **7**.

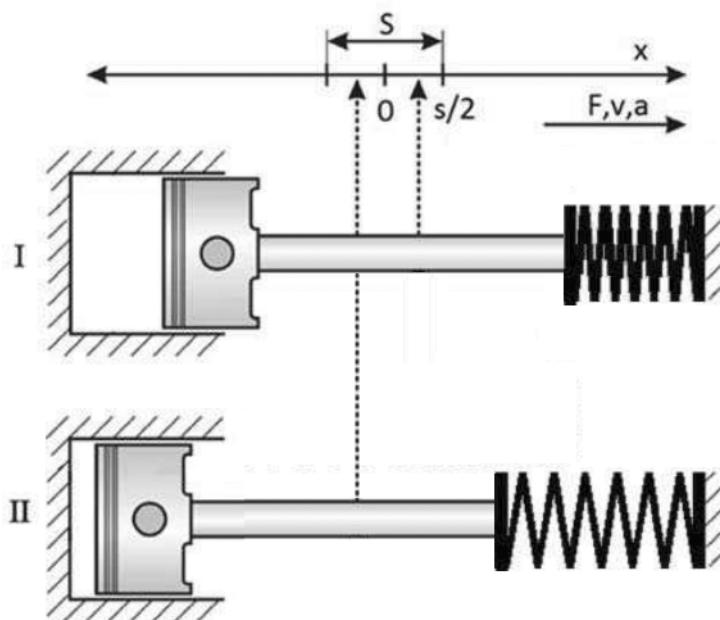
3.3 Simulační model

Motivace tvorby simulačního modelu je ověření základních předpokladů, ze kterých [9] vychází, a tedy ověření realizovatelnosti nové mechanické koncepce. Proto bude dále popsaný model obsahovat pouze části zásadní pro vlastní funkci motoru s volnými písty. Ostatní části z [9], které nemají na samotnou funkci vliv a pouze zvyšují výstupní výkon (např. výfuková turbína) modelovány nebudou.

Při tvorbě modelu nové koncepce jsem nejvíce vycházel z disertační práce [6] Pavla Němečka a diplomové práce [5] Tomáše Hauberta. Při návrhu modelu spalovací části jsem vycházel z disertační práce [3] Pavla Deutsche a diplomové práce [7] Stanislava Plška. Abych dosáhl co nejvyšší věrohodnosti modelu, model jsem vytvářel na základě výsledků dosažených při provozu obou modelů LCE.

3.3.1 Model mechanické části

Pro model mechanické části je nejprve potřeba definovat značení a orientaci základních veličin. Nulu souřadného systému jsem umístil do geometrického středu motoru. Použité pružiny definují klidový stav rotoru i statoru v geometrickém středu. Souřadná soustava je naznačena na obr. 3.2.



Obrázek 3.2: Definice veličin modelu podle nové koncepce

Model je navržen velmi jednoduše na základě elementárních fyzikálních vztahů. Vstupem do modelu je síla vyvozená elektrickým motorgenerátorem F_E a pro každý píst odpovídající tlak ve válci p_{cyl} . Síla vyvozená motorgenerátorem působí na oba písty stejně, pouze s opačným znaménkem. Síla vyvozená tlakem na píst je při dané ploše pístu A_p

$$F_p = A_p p_{cyl}. \quad (3.1)$$

Za předpokladu lineární závislosti působící síly na výchylku pružin lze sílu, kterou působí pružina na pístnici, určit jako

$$F_P = k_P x, \quad (3.2)$$

kde k_P je koeficient tuhosti pružiny. Dále je definována tlumící síla, která zobecňuje tření a tepelné ztráty

$$F_T = k_b v, \quad (3.3)$$

kde k_b je koeficient tlumení. Výslednice sil působících na pístnici je podle zavedené orientace rovna

$$F = F_p + F_E - F_T - F_P, \quad (3.4)$$

závislost rychlosti pohybu pístnice na této síle je

$$v = \frac{1}{m} \int F(t) dt, \quad (3.5)$$

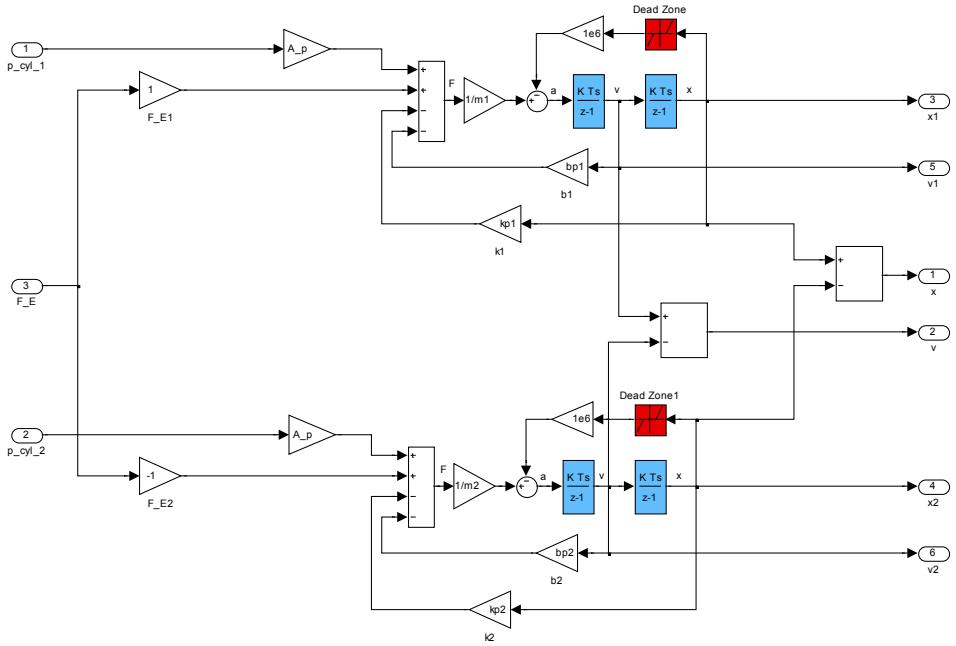
kde m je souhrnná hmotnost dané pístní soustavy. Pro okamžitou polohu pístnice platí

$$x = \int v(t) dt. \quad (3.6)$$

Rezonanční frekvence pístní soustavy se určí podle rovnice

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_P}{m}}. \quad (3.7)$$

Výstupy modelu jsou jak okamžité rychlosti a polohy jednotlivých pístů, tak i okamžitá vzájemná poloha a rychlosť obou pístů. Aby se respektoval fakt, že existují jisté maximální dorazy, za které se LCE nemůže pohybovat, je navíc přidána zpětná vazba, jejíž pásmo necitlivosti odpovídá maximálnímu zdvihu. Celé simulační schéma mechanické části je na obr. 3.3.



Obrázek 3.3: Schéma mechanické části

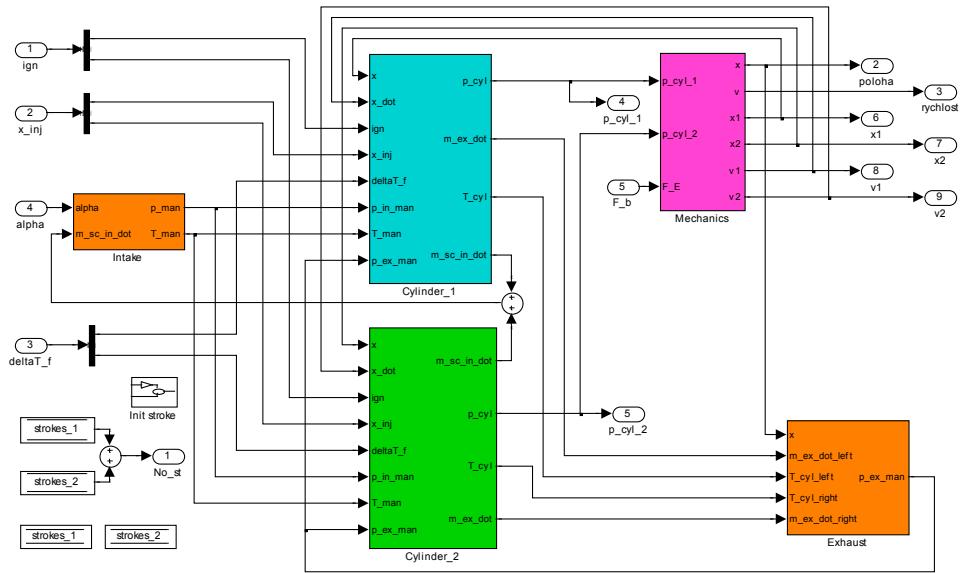
3.3.2 Model termodynamické části

Při tvorbě modelu termodynamické části jsem vycházel z modelu popsaném v [7]. Podrobnější a detailnější model lze nalézt v [3] a [6], pro prvotní model nové koncepce ale postačuje model z [7], který umožňuje řídit všechny potřebné veličiny. Model jsem přepracoval podle nové koncepce – vyměnil jsem model mechanické části za model 3.3.1 a upravil zapojení válců. Vnitřní struktura jednotlivých bloků mohla zůstat nezměněná.

Funkce modelu začíná od bloku sacího potrubí (*Intake*), kde se pomocí velikosti vstupního parametru (*alpha*) určuje tlak uvnitř tohoto potrubí, které vede k oběma válcům (*Cylinder_1* a *Cylinder_2*), ve kterých jsou řešeny děje v nich probíhající. Dalšími bloky jsou blok modelující procesy ve výfukovém potrubí (*Exhaust*), blok dynamiky LCE (*Mechanics*) a blok simulující elektrický motorgenerátor (*elektricky motorgenerator*). Simulační schéma termodynamické části je na obr. 3.4.

3.3.3 Model elektrické části lineárního motoru

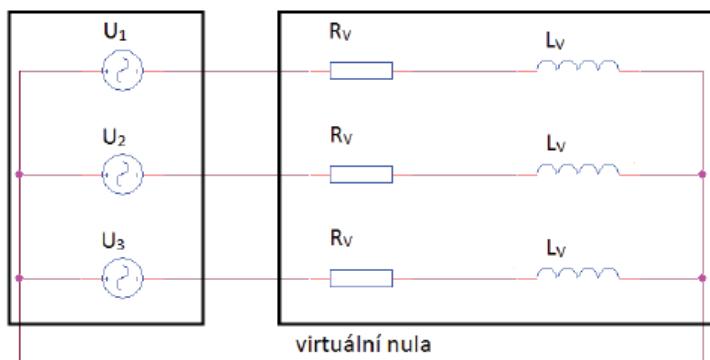
Lineární motor je stejně jako klasický rotační motor tvořen dvěma částmi – statorem a rotorem. U rotačního motoru se rotor otáčí kolem své osy. V případě lineárního motoru je rotace nahrazena posuvem. Obvykle se posouvající se část nazývá rotorem a



Obrázek 3.4: Schéma termodynamické části

pevná, ukotvená část statorem, v případě nové koncepce motoru s volnými písty se ale pohybují obě dvě části. To ale nezabránuje převzetí již dříve vytvořených modelů, pouze místo aktuální polohy a rychlosti rotoru budu uvažovat vzájemnou polohu a rychlosť mezi rotorem a statorem. Při sestavování modelu elektrické části jsem vycházel z [5].

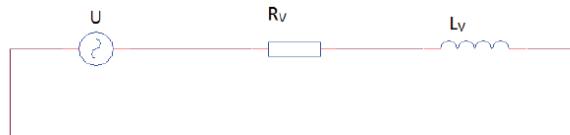
Vzhledem k přítomnosti permanentních magnetů, kterými je tvořen rotor, se jedná o synchronní stroj s vinutími zapojenými do hvězdy. Pro určení proudů ve vinutí je třeba znát jeho náhradní zapojení – obr. 3.5. Vlevo jsou vyznačeny zdroje napětí a vpravo vlastní motor.



Obrázek 3.5: Elektrické schéma motoru se zdrojem napětí – převzato z [5]

Motor se skládá z indukčnosti L_v a odporu R_v . Cívky motoru jsou zapojeny do hvězdy a vzájemná indukčnost není uvažována. Napájecí zdroj je tvořený třífázovým můstkom,

který si lze představit jako tři nezávislé zdroje napětí. Vzhledem k symetriím ve všech větvích je rozdíl potenciálu nulový, můžeme proto zavést vodič „virtuální nula“. Díky tomuto vodiči se celý obvod zdroje a motoru rozdělí na tři stejné obvody (viz obr. 3.6).



Obrázek 3.6: Elementární obvod jedné části zdroje a motoru – převzato z [5]

Pro obvod zobrazený na obr. 3.6 můžeme psát obvodovou rovnici

$$u = iR_v + L_v \frac{di}{dt}. \quad (3.8)$$

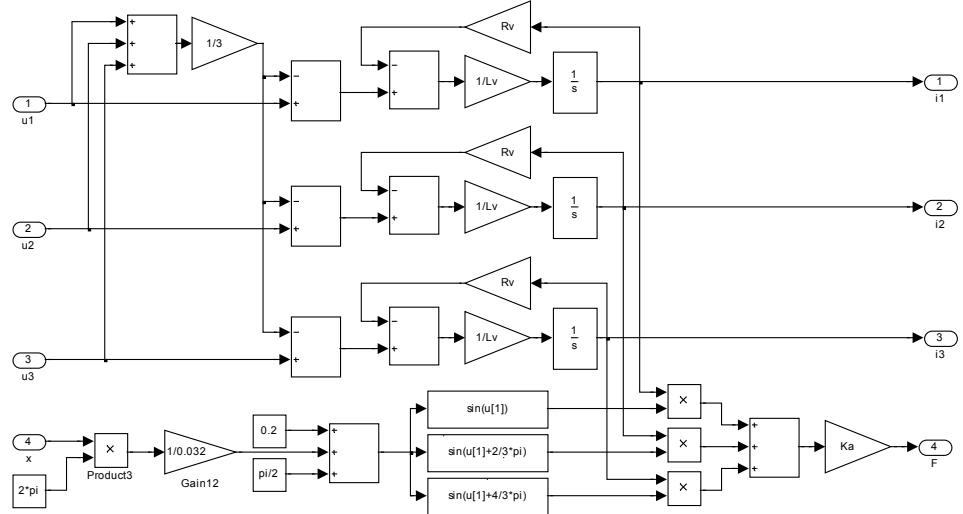
Vstupem do modelu podle obr. 3.6 je napětí na sériové kombinaci odporu R_v a indukčnosti L_v . Vstupem do motoru jsou však podle obr. 3.5 napětí označená jako $U_1(t)$, $U_2(t)$ a $U_3(t)$. Je tedy potřeba odečíst hodnotu potenciálu v bodě 0. Uvažují-li se všechna tři vinutí jako shodná, lze pomocí metody uzlových napětí dospět ke vztahu

$$u_0(t) = \frac{1}{3}(u_1(t) + u_2(t) + u_3(t)), \quad (3.9)$$

což pro případ fázového posunutí jednotlivých fází o 120° lze zjednodušit do vztahu

$$u_0(t) = \frac{3}{2}U_0, \quad (3.10)$$

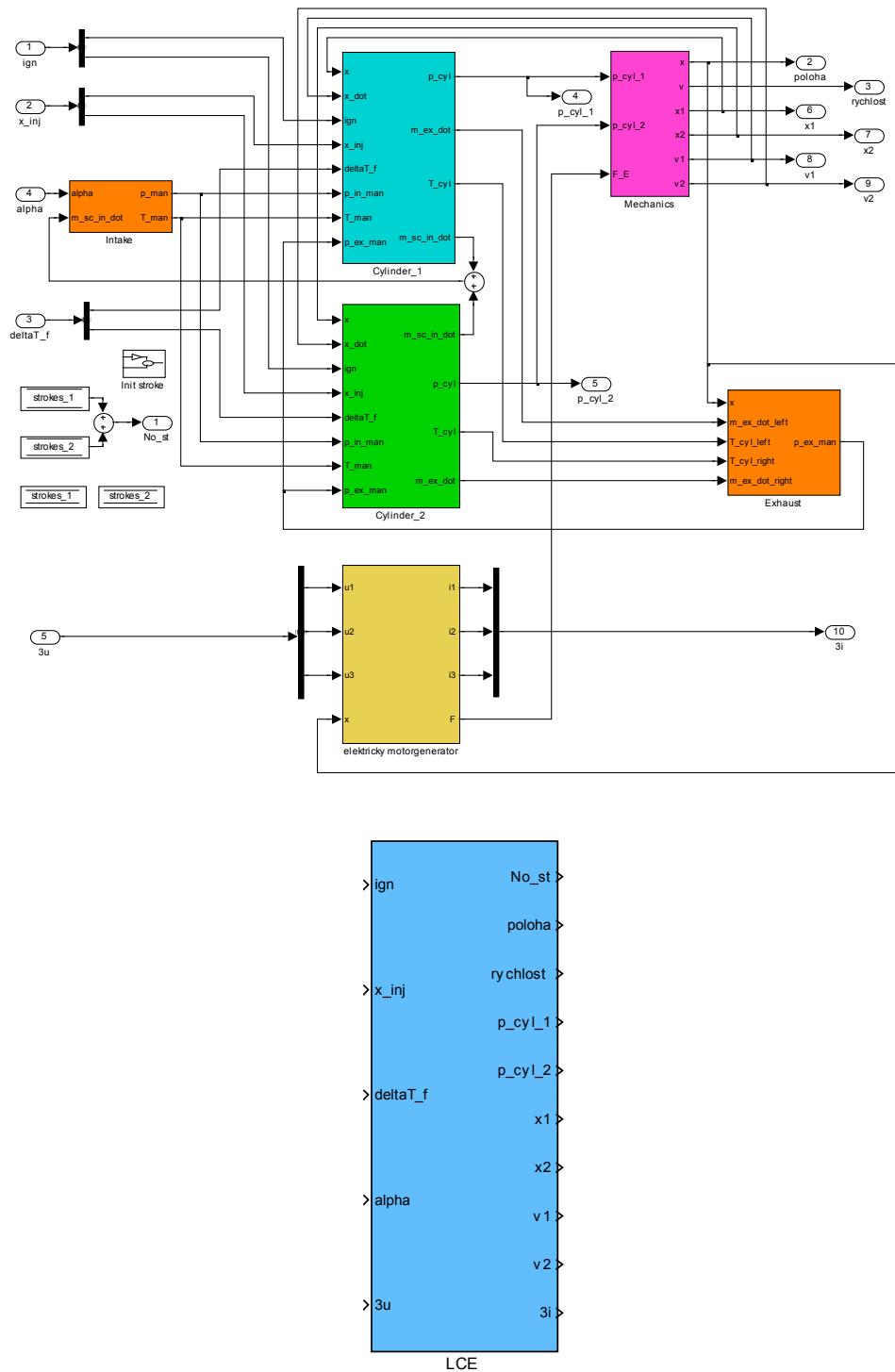
kde napětí U_0 představuje napájecí napětí můstku (v modelu označované jako U_{ss}). Vztah 3.10 však platí pro symetrii třífázového napájení a jeho užití není vhodné v případě porušení symetrie třífázového napájení. Vstupem do modelu jsou okamžité hodnoty fázových napětí $u_1(t)$, $u_2(t)$, $u_3(t)$ a okamžitá vzájemná poloha rotoru a statoru $x(t)$. Výstupem modelu jsou hodnoty okamžitých proudů v jednotlivých vinutích $i_1(t)$, $i_2(t)$, $i_3(t)$ a okamžitá síla $F(t)$ vyvolaná těmito proudy. Celkové schéma je na obr. 3.7.



Obrázek 3.7: Schéma elektrické části lineárního motoru

3.3.4 Celkový model nové koncepce LCE

Spojením modelů mechanické, elektrické a termodynamické části dostaneme celkový model lineárního spalovacího motoru, který je zobrazen na obr. 3.8. Vstupy modelu jsou zapalovací pulzy ign , poloha vstřiku paliva x_inj , množství paliva, dané délkou doby přípravy paliva T_f , úhel otevření škrtící klapky sacího potrubí $alpha$ a okamžité hodnoty třífázového napětí $3u$. Výstupy jsou počet zápalů za sekundu No_st , aktuální vzájemná poloha $poloha$ a rychlosť $rychlosť$ pístů, polohy $x1, x2$, rychlosti $v1, v2$ a tlaky ve válcích $p1, p2$ jednotlivých pístů a hodnoty okamžitých proudů $3i$ v jednotlivých vinutích.



Obrázek 3.8: Celkový model nové koncepce LCE

3.4 Řídicí systém

Úkolem řídícího systému je rozběh motoru a po dosažení požadované amplitudy kmitů zajistění přesné synchronizace spalování. Řídicí systém určuje pro každý píst dávku paliva a okamžik zážehu v konkrétním termodynamickém cyklu.

Řídící systém se skládá z několika nezávislých částí (proudový regulátor, řízení vstřikování, řízení zapalování a řízení brzdné síly). Za součást řídícího systému také považují blok úpravy signálů pro aplikaci ControlDesk, ve které lze řízení celého procesu manuálně upravovat.

3.4.1 Proudový regulátor

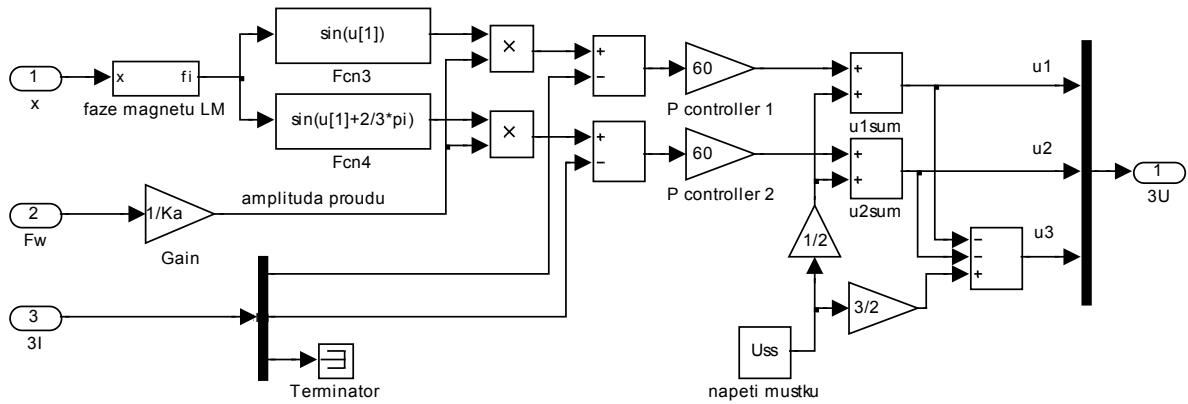
Úkolem proudového regulátoru je generovat silové působení lineárního motorgenerátoru co do velikosti i směru. Vstupní veličina je požadovaná síla F v orientaci dle obr. 3.2. Celkem se skládá ze tří bloků: generátor fáze, regulátor a dekompoziční blok. Generátor fáze generuje z měřené polohy soustavy referenčních proudů, regulátor zajistuje jejich skutečné hodnoty a dekompoziční blok slouží k tomu, aby výstup z každého regulátoru ovlivňoval pouze napětí v příslušné větvi. Výstupem této vrstvy jsou aktuální hodnoty jednotlivých napětí přiváděných na lineární motorgenerátor.

Síla vyvíjená vzájemným působením magnetického pole statoru a rotoru závisí na velikosti indukce mezi oběma poli a také na jejich vzájemném fázovém posuvu. Je logické, že tuto sílu je třeba maximalizovat a to se bude dít při vzájemném fázovém posunutí obou polí o $\frac{\pi}{2}$ – úkolem regulátoru je tedy zajistit posunutí magnetického pole vinutí o $\frac{\pi}{2}$ proti magnetickému poli rotoru.

Proudový regulátor byl navržen v rámci diplomové práce [5] Tomáše Hauberta, kde lze najít podrobný popis i postup návrhu. Schéma proudového regulátoru je na obr 3.9.

3.4.2 Řízení množství vstříknutého paliva

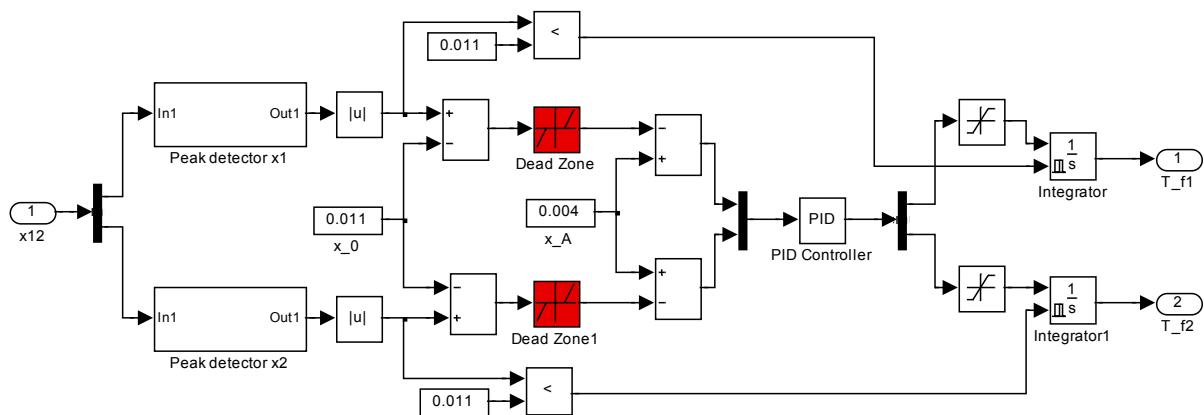
Množství vstříknutého paliva do spalovací komory je odvozeno od délky trvání otevření elektronicky ovládaného palivového ventilu a od rozdílu mezi vnitřním tlakem paliva a tlakem vzduchu. Proces vstřikování začíná otevřením palivového elektronického ventilu pro přesně definovaný čas přípravy požadovaného množství paliva v komoře předběžného



Obrázek 3.9: Schéma proudového regulátoru

namíchání. Dalším krokem je samotné vstříknutí. To se provede otevřením elektronicky kontrolovaného vzduchového ventilu. Díky tomuto principu, je proces vstřikování pouze minimálně ovlivňován tvorbou palivového filmu a proto může být celá dynamika paliva zanedbána.

Blok řízení délky doby přípravy paliva začíná detektory amplitudy kmitání jednotlivých pístů. Výstup je neaktivní dokud amplituda nepřesáhne prahovou hodnotu x_0 . Po překonání prahové hodnoty se rozdíl mezi aktuální amplitudou a požadovanou amplitudou x_A dostane na vstup PID regulátoru. Výstup PID regulátoru je integrován a výstup integrátoru je čas přípravy paliva pro daný píst. Schéma bloku řízení délky doby přípravy paliva je na obr 3.10.

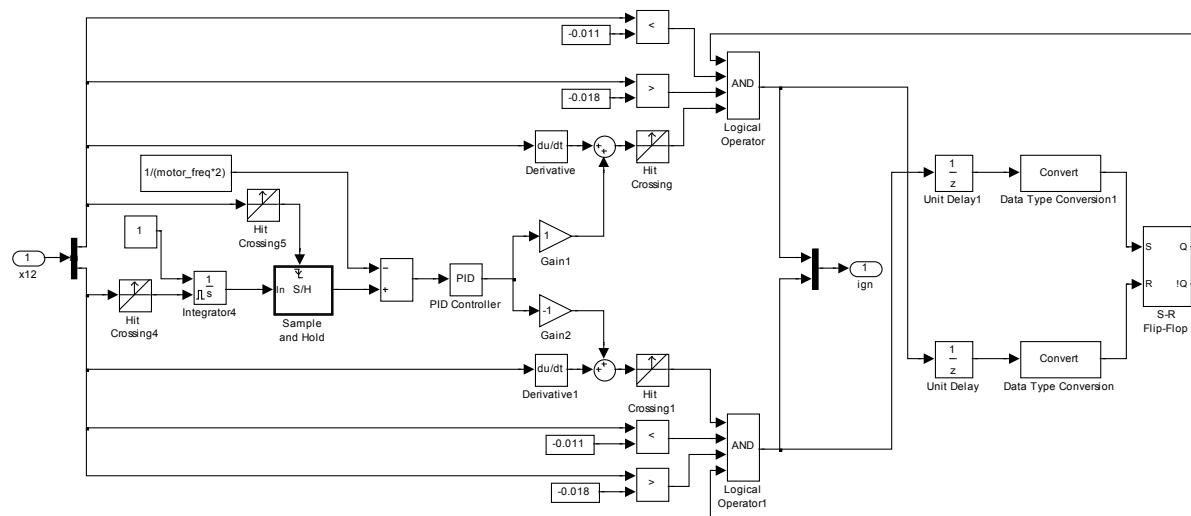


Obrázek 3.10: Řízení přípravy paliva

3.4.3 Řízení zapalování

Blok řízení zapalování (viz obr. 3.11) zajišťuje kontrolu správné pozice zápalu pro oba písty. Pro oba písty je definována minimální i maximální poloha zápalu. Minimální limit polohy zajišťuje, aby nedocházelo k zápalu dříve, než dojde ke vstříknutí paliva a komprese směsi. Maximální limit zajišťuje ochranu před zničením pístů – pokud je amplituda kmitání příliš velká, zapalování se zastaví. Ochrannou funkci má i S-R klopný obvod, který zajišťuje aby se zapalovací impulzy pro oba písty střídaly – pokud by docházelo k zapálení směsi pouze v jednom pístu, došlo by k nebezpečnému rozkmitání celé soustavy, které není možné utlumit zásahem lineárního motorgenerátoru.

Druhá část bloku řízení zapalování řídí pozici zápalu. Tato část začíná detektorem fázového rozdílu pohybu pístů. Pokud fázový rozdíl odpovídá rezonanční frekvenci motoru, dojde k vyslání zapalovacího impulzu v okamžiku, kdy se píst dostane do horní úvratí. Pokud se fázový rozdíl liší od rezonanční frekvence, zasáhne regulátor, který adekvátně posune pozici zápalu, aby došlo k srovnání fázového rozdílu.



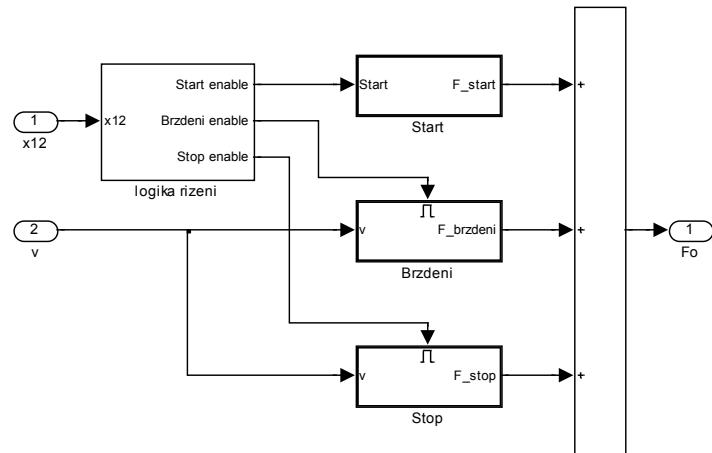
Obrázek 3.11: Řízení zapalování

3.4.4 Řízení síly lineárního motorgenerátoru

Blok řízení síly má za úkol nejprve zajistit start motoru – rozkmitání obou pístů pomocí periodického signálu o frekvenci odpovídající rezonanční frekvenci motoru. Po dosažení

dostatečné amplitudy kmitů dojde k odpojení startovacího signálu a blok se přepne do režimu brzdění. Brzdící síla je přímo úměrná průběhu vzájemné rychlosti pístů.

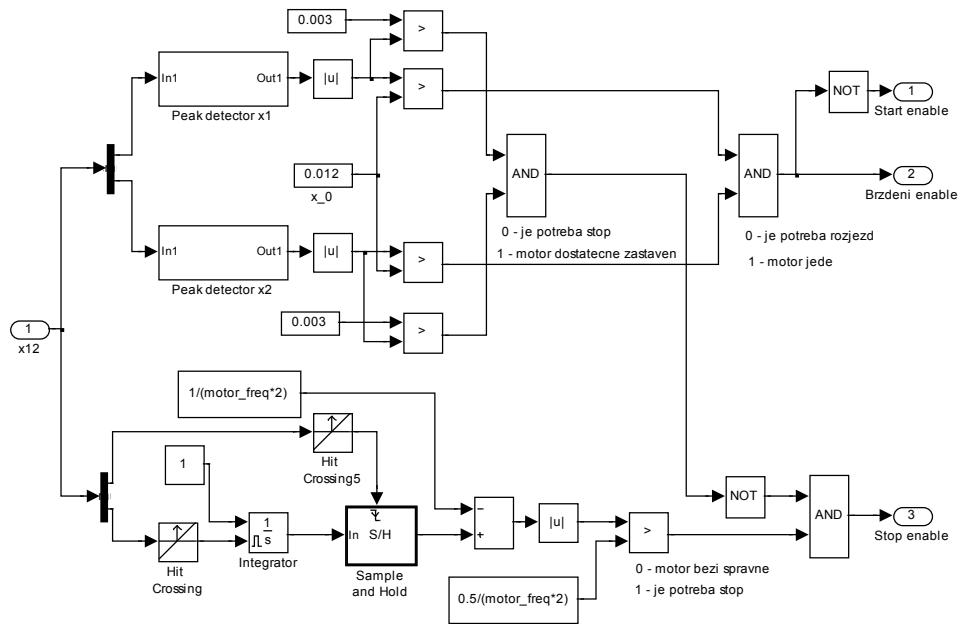
Na obr. 3.12 je schéma celého bloku řízení síly. Vstupy jsou aktuální poloha obou pístů a jejich vzájemná rychlosť, výstupem je požadovaná síla. Blok *logika rizeni* podle polohy pístů řídí bloky *Start*, *Brzdeni* a *Stop*.



Obrázek 3.12: Řízení síly lineárního motorgenerátoru

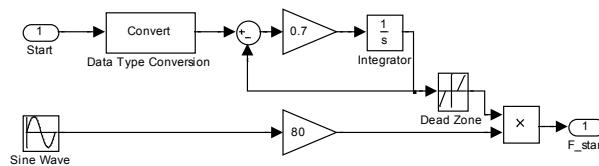
Schéma bloku *logika rizeni* je na obr. 3.13. Dokud není amplituda kmitů obou pístů větší než prahová hodnota, je aktivní výstup *Start enable*. Poté, co oba písty překonají prahovou hodnotu, kdy už je zajištěné zapalování, dojde k vypnutí výstupu *Start enable* a zapnutí výstupu *Brzdeni enable*.

Druhá část bloku má na starost hlídání fázového posunu mezi kmity obou pístů. Pokud dojde k porušení synchronizace mezi oběma písty, zapne se výstup *Stop enable*, který kmitání obou pístů zastaví. Po zastavení kmitání dojde opět k zapojení výstupu *Start enable*, který zajistí opětovný rozjezd motoru se správným fázovým posunem.

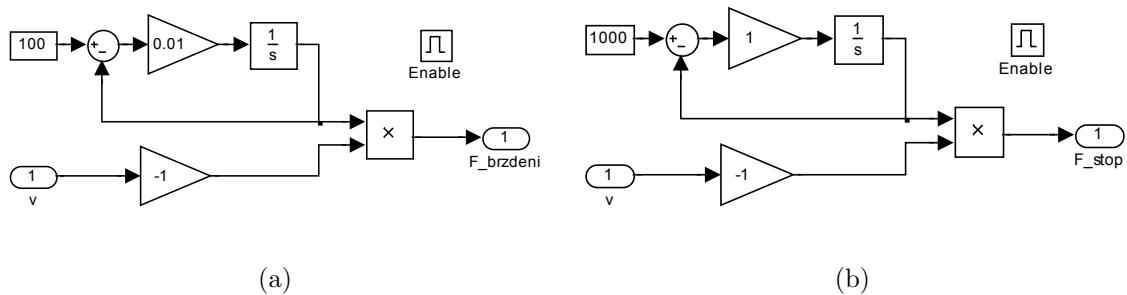


Obrázek 3.13: Logika startu a brzdění

Na obr. 3.14 je schéma regulátoru startovací síly a na obr. 3.15 je schéma regulátorů řízeného brzdění a bezpečnostního zastavení. Hlavním úkolem těchto regulátorů je zajištění plynulého rozběhu a doběhu průběhu požadované síly při skokových změnách logických řídicích signálů.



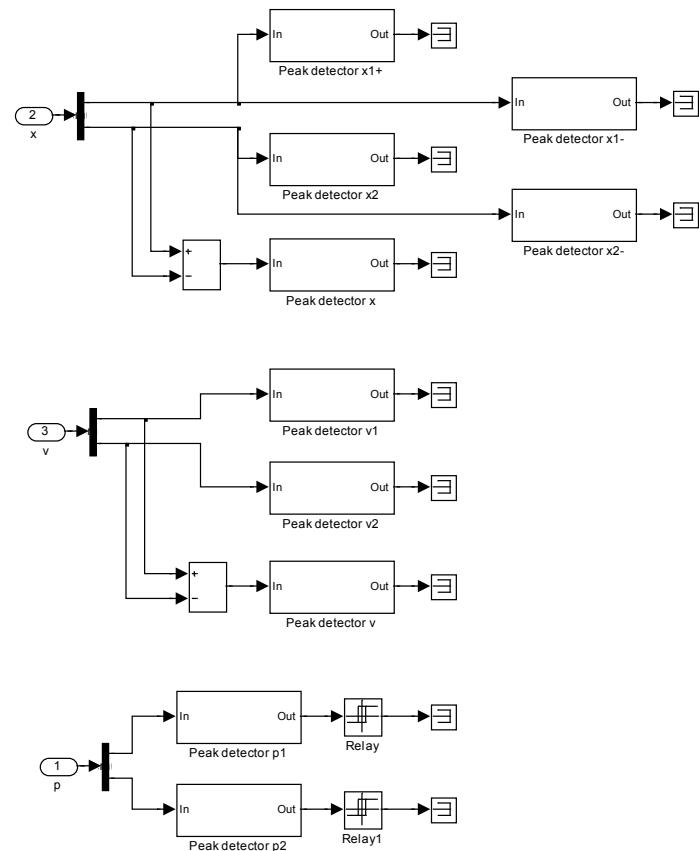
Obrázek 3.14: Regulátor startovací síly



Obrázek 3.15: Regulátory řízeného brzdění a bezpečnostního zastavení

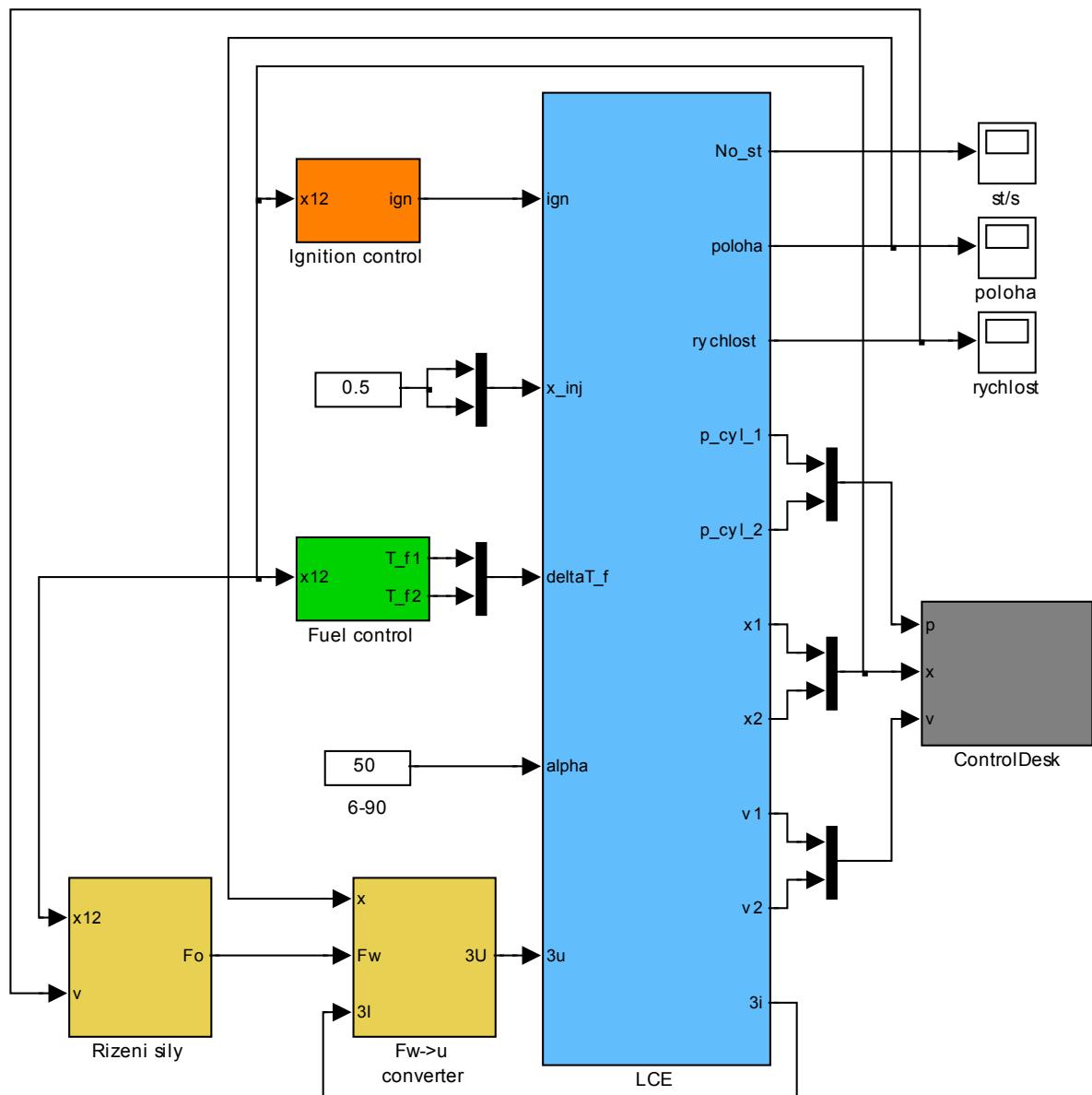
3.4.5 ControlDesk

Blok ControlDesk (viz obr. 3.16) zajišťuje pouze detekci amplitud jednotlivých signálů. Amplitudy jsou následně zobrazeny na řídicím panelu v aplikaci ControlDesk, což umožňuje lepší přehled o probíhající simulaci.



Obrázek 3.16: Výstup pro vizualizaci a řízení v aplikaci ControlDesk

3.4.6 Celkové simulační schéma



Obrázek 3.17: Celkové simulační schéma

3.5 Shrnutí výsledků simulací

Po sestavení celého modelu lineárního spalovacího motoru nové mechanické koncepce je potřeba definovat všechny v modelu použité konstanty. Hodnoty pro konstanty termodynamické a elektrické části jsem převzal z aktuálního modelu LCE-02P – model předpokládá použití stejného lineárního motorgenerátoru, stejných válců a stejný koncept vstřikování a zapalování paliva. Zbývá tedy pouze definovat konstanty mechanického modelu, který je odlišný.

Podle rovnice 3.7 závisí rezonanční frekvence pístní skupiny na tuhosti pružiny a hmotnosti pístní soustavy. Mezi jeden z předpokladů nové koncepce patří stejná hmotnost a stejná rezonanční frekvence obou pístních skupin. Po konzultaci s vedoucím práce byla stanovena předpokládaná hmotnost jedné pístní skupiny $m = 5 \text{ kg}$ a požadovaná rezonanční frekvence $f = 30 \text{ Hz}$. Z rovnice 3.7 lze dopočítat požadovanou hodnotu tuhosti pružiny $k_P = 177653 \frac{\text{N}}{\text{m}}$. Tato hodnota řádově odpovídá hodnotě tuhosti pružin použitých v LCE-02P, proto se dá předpokládat že bude reálné takovou pružinu zkonstruovat. Na základě zkušeností s provozem LCE-02P byla stanovena konstanta tlumení $k_b = 10 \frac{\text{Ns}}{\text{m}}$. Seznam konstant mechanické části je shrnut v tab. 3.2.

Název konstanty	Označení konstanty	Velikost	Jednotka
Hmotnost pístní skupiny	m_1, m_2	5	kg
Tuhost pružin	k_{P1}, k_{P1}	177653	$\frac{\text{N}}{\text{m}}$
Tlumení	k_{b1}, k_{b2}	10	$\frac{\text{Ns}}{\text{m}}$

Tabulka 3.2: Seznam konstant mechanické části

Provedené simulace potvrdily, že za daných předpokladů je možné realizovat lineární spalovací motor podle mechanické koncepce uvedené v [9]. Pro správnou funkčnost je nejdůležitější dodržení dvou předpokladů – hmotnost obou pístních soustav musí být stejná a konstanta tuhosti obou pružin musí být stejná stejná. Za těchto předpokladů mají obě pohyblivé části stejnou rezonanční frekvenci a udržení pístů v protiběžném pohybu nevyžaduje příliš velké akční zásahy řízení. V případě, že rezonanční frekvence obou částí nejsou stejné, je sice možné udržet motor v chodu, řídicí systém ale musí neustále akčními zásahy korigovat pohyb pístů. Tím dochází k podstatnému snížení výkonu motoru.

Simulace dále ukázaly, že parametr tlumení nijak neovlivní chod motoru, ale z fyzikální podstaty určuje rezonanční převýšení pohyblivých částí. Za předpokladu stejné rezonanční frekvence obou pístních soustav je pro zvýšení možného výkonu motoru nutné co nejvíce snížit tlumení.

Kapitola 4

Závěr

Tato diplomová práce se skládá ze dvou částí. První část se zabývá přenosem kompletního řídicího systému na novou platformu dSpace MicroAutoBox (kapitola 2) a druhá vytvořením simulačního modelu nové mechanické koncepce motoru s volnými písty (kapitola 3). Pro model nové koncepce byl dále navržen řídicí systém a z výsledků simulací byly stanoveny předpoklady umožňující zlepšení parametrů lineárního spalovacího motoru.

Před samotným přenosem řídicího systému bylo nejprve nutné důkladně se seznámit s mechanickou i programovou koncepcí a s principem řízení funkčního vzorku lineárního spalovacího motoru LCE-02P. Poté bylo možné přenést řídicí systém a začít s oživováním celého systému. Při přenosu řízení elektrické části se vyskytl problém s příliš krátkou periodou vzorkování. Po zvýšení periody vzorkování se podařilo systém oživit a otestovat. Následně bylo přeneseno a upraveno i řízení spalovací části, které ale kvůli závadě na jednom pístu bohužel nebylo možné kompletně otestovat.

Při tvorbě simulačního modelu jsem mohl vycházet z již vytvořených a validovaných modelů obou funkčních vzorků LCE-01 a LCE-02P. Navržený řídicí systém pro novou koncepci naopak musí být originální. V případě původní mechanické koncepce je hlavním řídicím prvkem zajišťujícím chod motoru lineární motorgenerátor, řízení spalovací části je důležité pro optimalizaci spalovacího procesu. Při řízení motoru s volnými písty podle nové koncepce ale nelze silou lineárního motorgenerátoru vyvzovat adekvátní řídicí zásahy, protože silové účinky vyvozené lineárním motorgenerátorem stejnoměrně ovlivňují pohyb rotoru i statoru.

Vytvořený simulinkový model umožňuje snadnou změnu vnitřních parametrů lineárního

spalovacího motoru i jednotlivých částí řídicího systému. Proto byla pro model vytvořena vizualizace v aplikaci ControlDesk, díky které je možné ovládat všechny parametry motoru i řídicího systému a zobrazovat „real-time“ průběh simulace.

Literatura

- [1] *Webové stránky projektu LCE*. 2012, [online] (<http://www.lceproject.org/>).
- [2] *Webové stránky společnosti dSpace*. 2012, [online] (<http://www.dspace.com/>).
- [3] DEUTSCH, P.: *In-cycle model and combustion control of the free-piston engine*. Dizertační práce, České vysoké učení technické v Praze, 2008.
- [4] HAUBERT, T.: *Interface pro spojení vývojového systému dSpace MicroBox s lineárním spalovacím motorem LCE 02*. Bakalářská práce, České vysoké učení technické v Praze, 2008.
- [5] HAUBERT, T.: *Jednotka řízení pro lineární spalovací motor pracující v rezonančním módu*. Diplomová práce, České vysoké učení technické v Praze, 2010.
- [6] NĚMEČEK, P.: *Lineární spalovací motor*. Dizertační práce, České vysoké učení technické v Praze, 2009.
- [7] PLŠEK, S.: *Validace modelu lineárního spalovacího motoru*. Diplomová práce, České vysoké učení technické v Praze, 2007.
- [8] ŠINDELKA, M.: *Lineární spalovací motor*. Dizertační práce, České vysoké učení technické v Praze, 2006.
- [9] VYSOKÝ, O.: Lineární motorgenerátor s volnými písty. 2011, čs. patent č. 302 310.

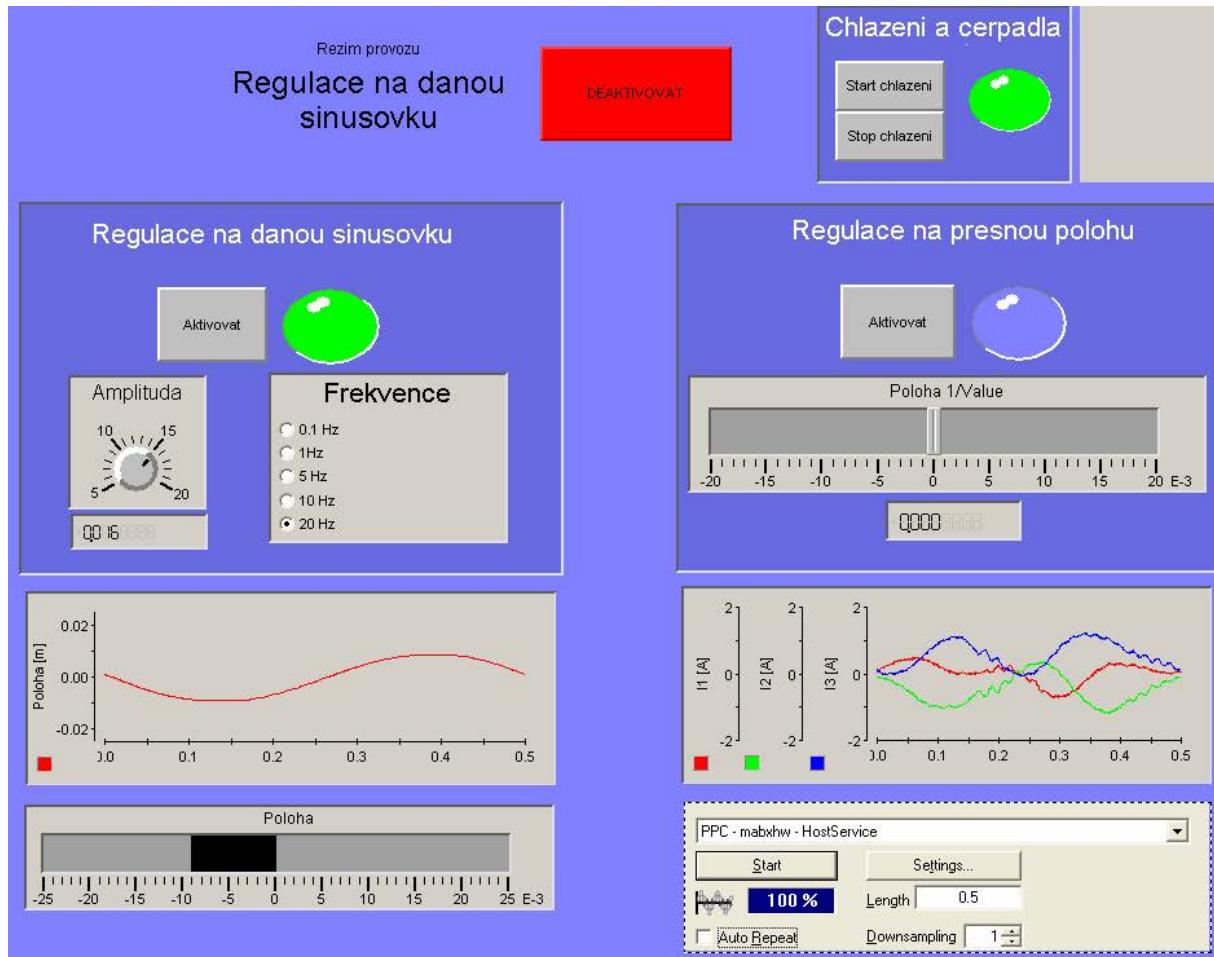
Příloha A

ControlDesk – řízení LCE

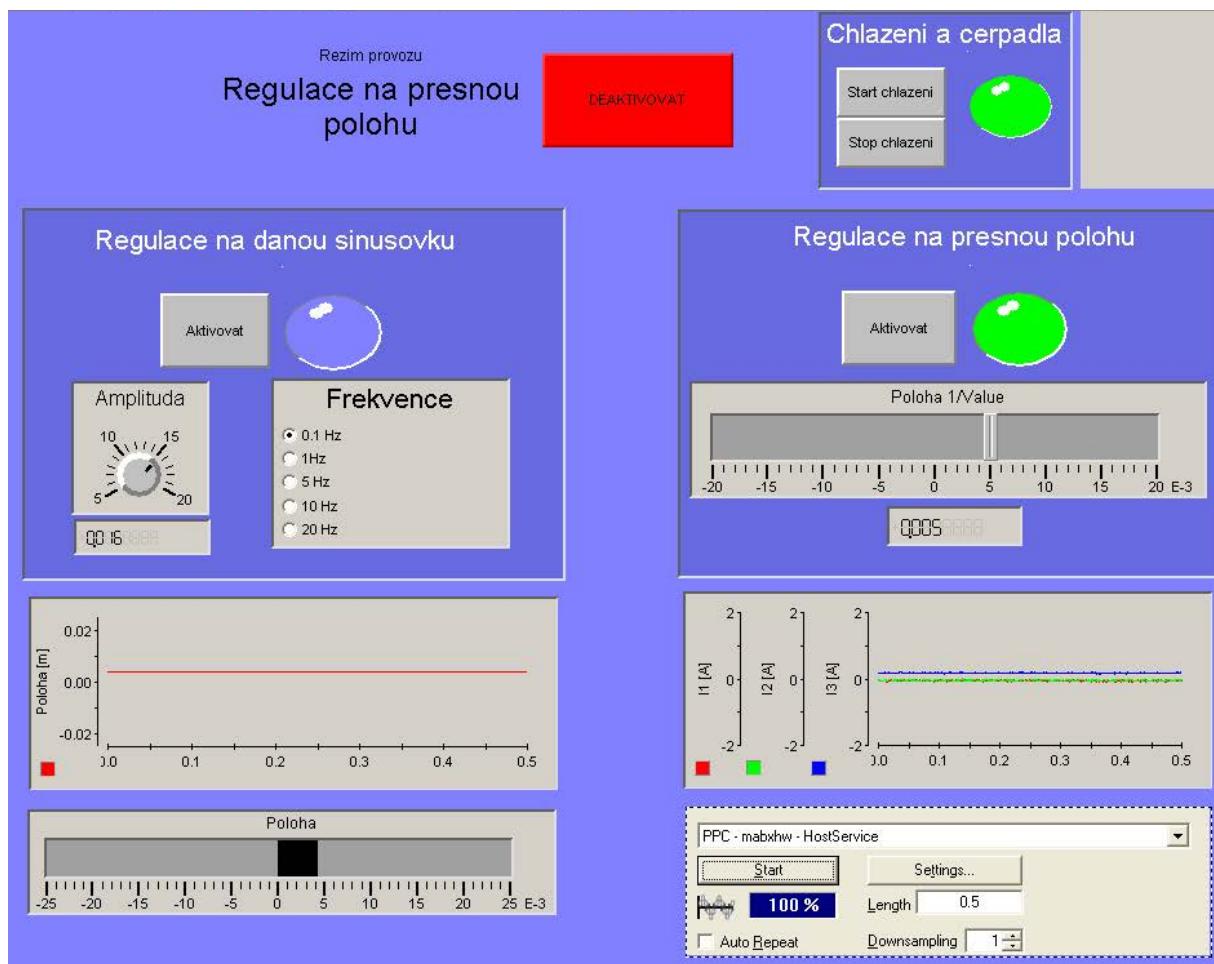
Regulace na danou sinusovku

Regulace na danou polohu

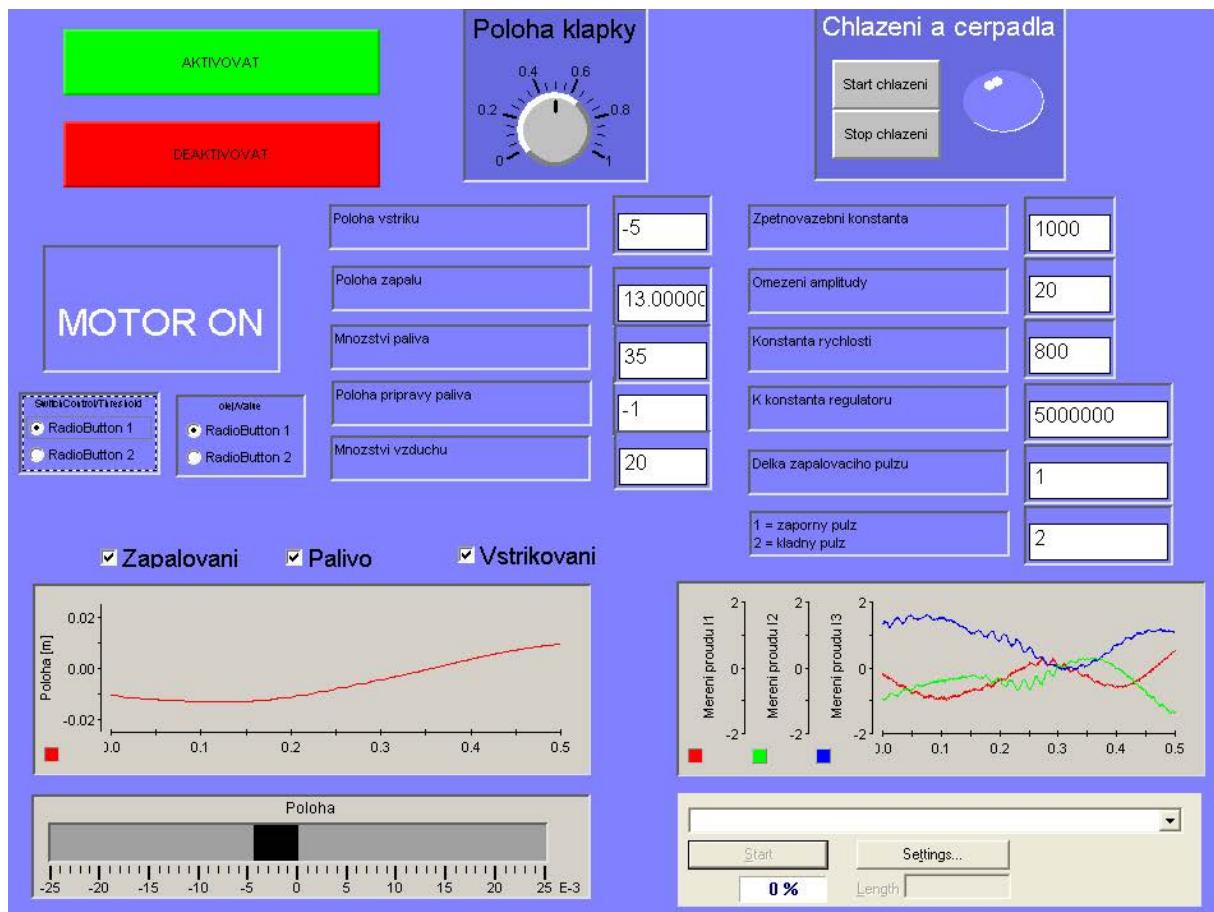
Řízení spalovací části



Obrázek A.1: ControlDesk – Regulace na danou sinusovku



Obrázek A.2: ControlDesk – Regulace na přesnou polohu



Obrázek A.3: ControlDesk – Řízení spalovací části

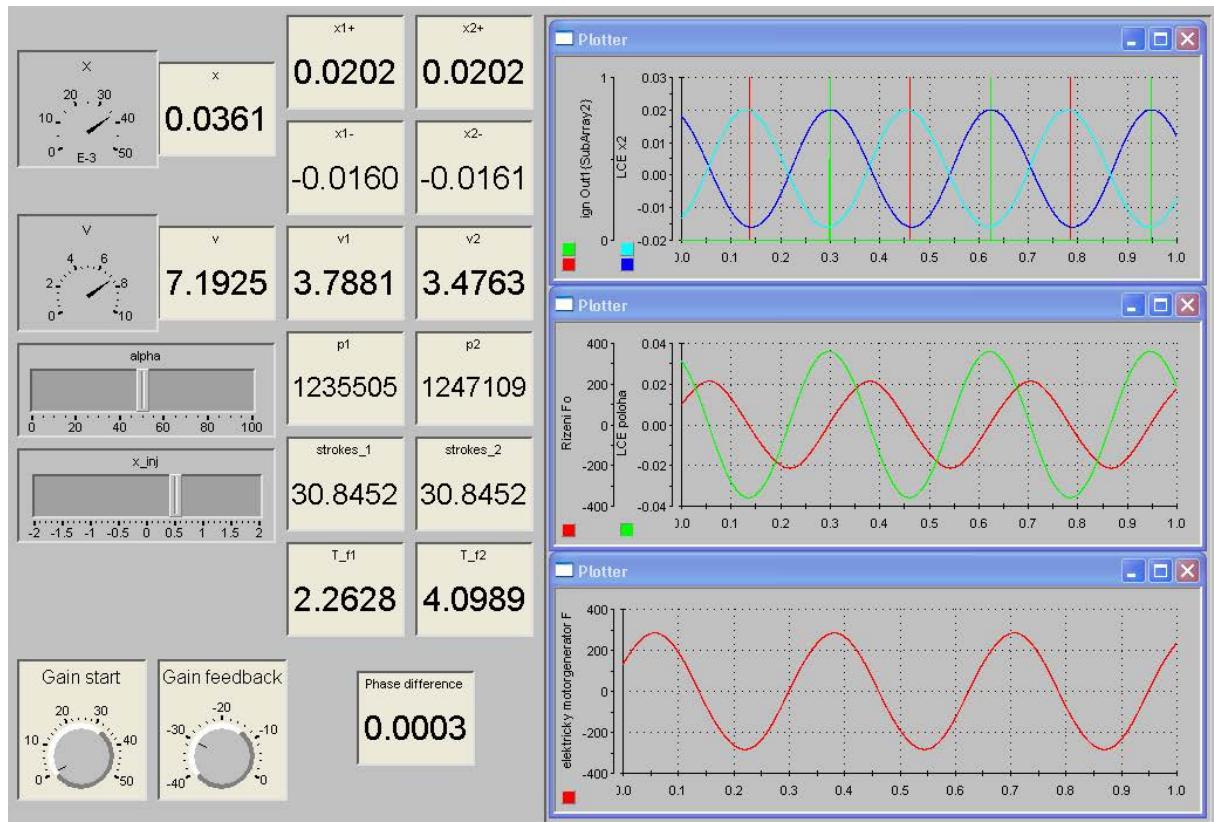
Příloha B

ControlDesk – simulace nové koncepce

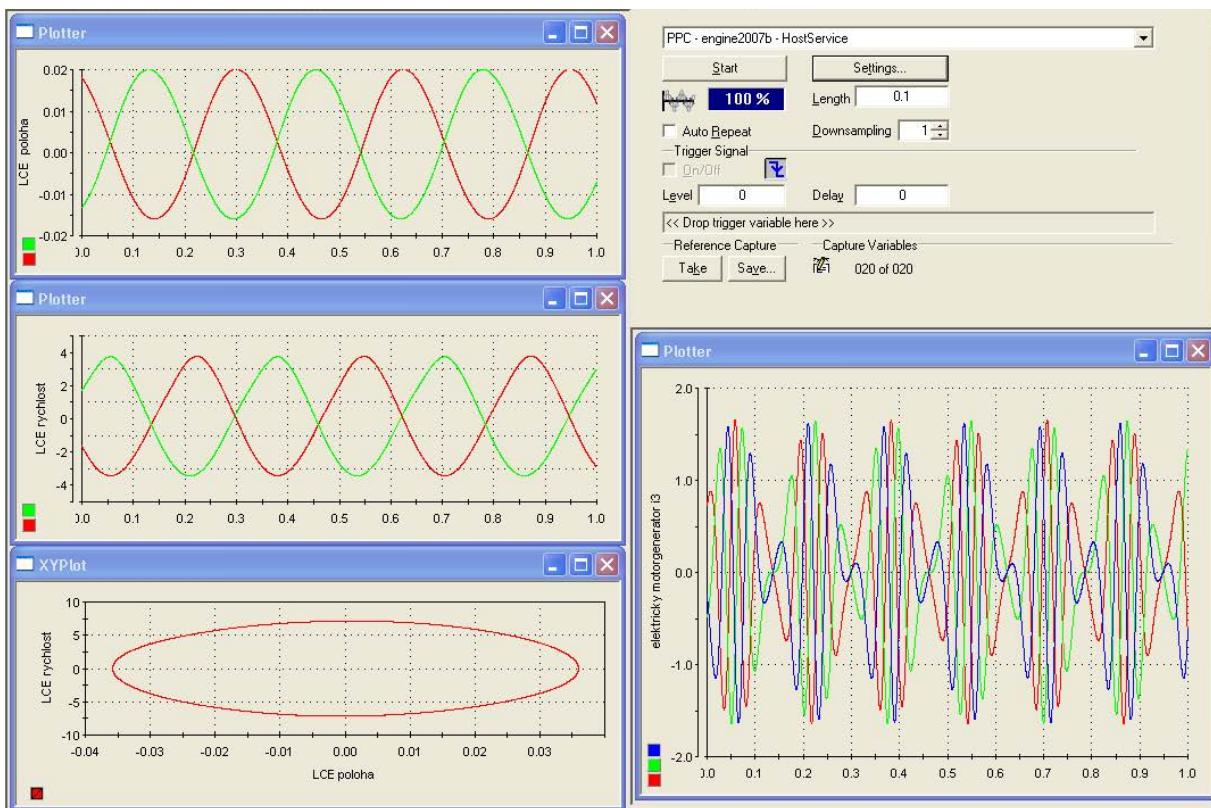
Řídicí panel

Vizualizace průběhů

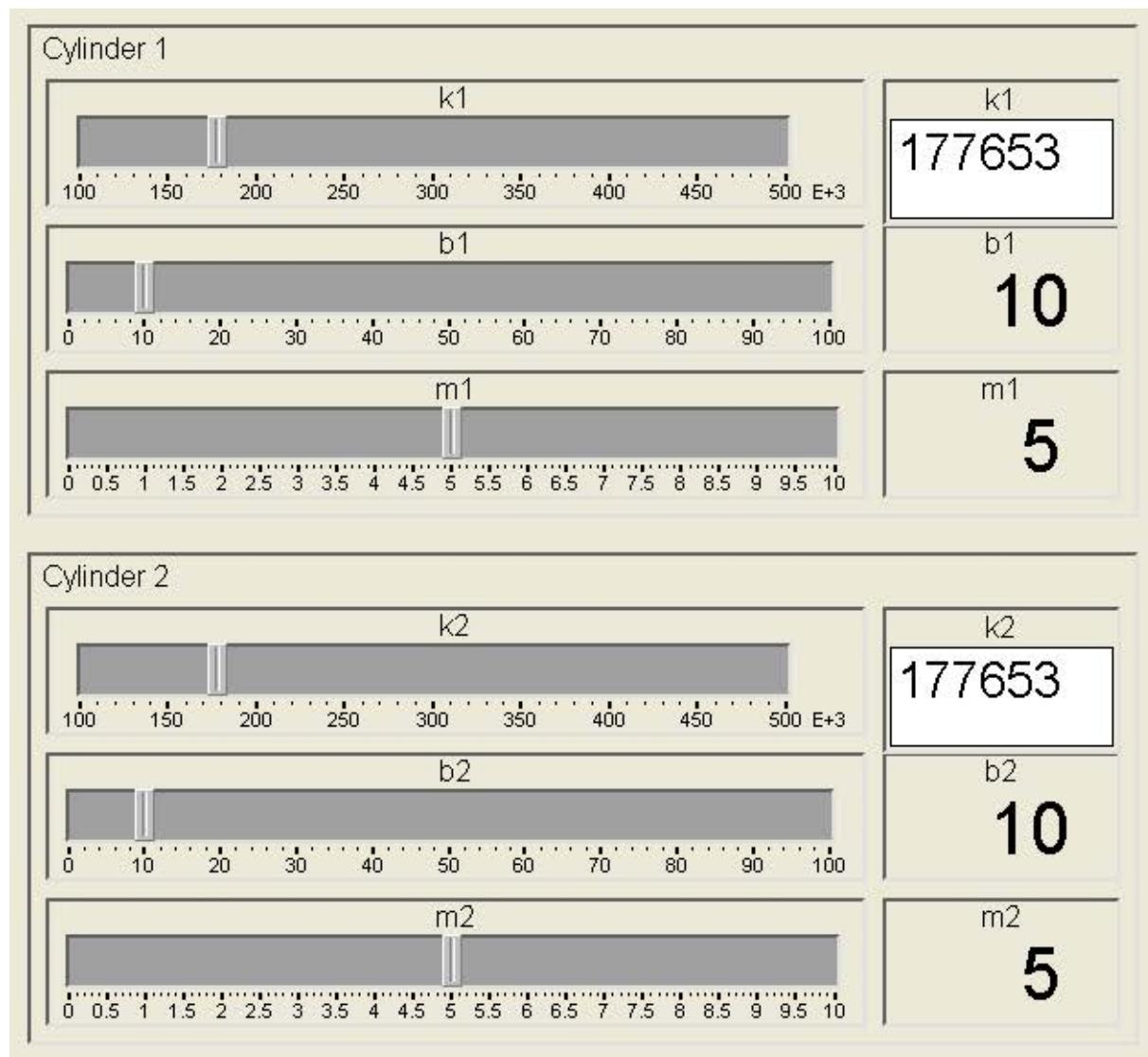
Nastavení mechanických vlastností



Obrázek B.1: ControlDesk – řídicí panel



Obrázek B.2: ControlDesk – vizualizace průběhů



Obrázek B.3: ControlDesk – nastavení mechanických vlastností

Příloha C

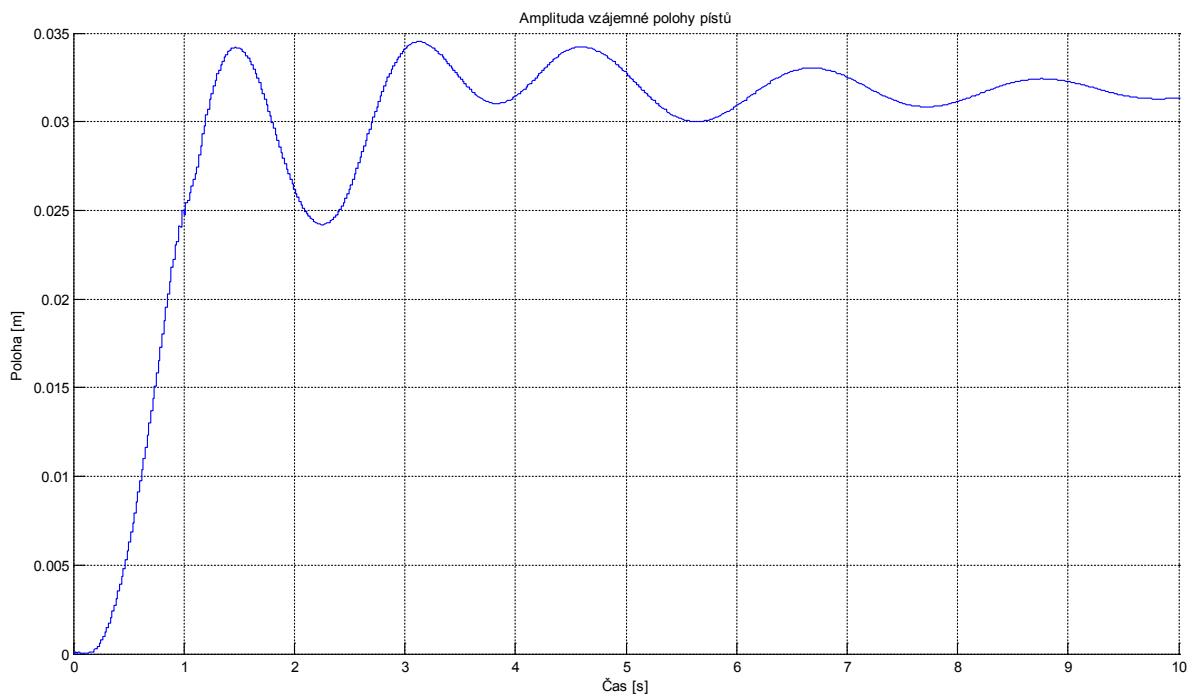
Simulace nové koncepce – rozbeh motoru

Amplituda vzájemné polohy pístů

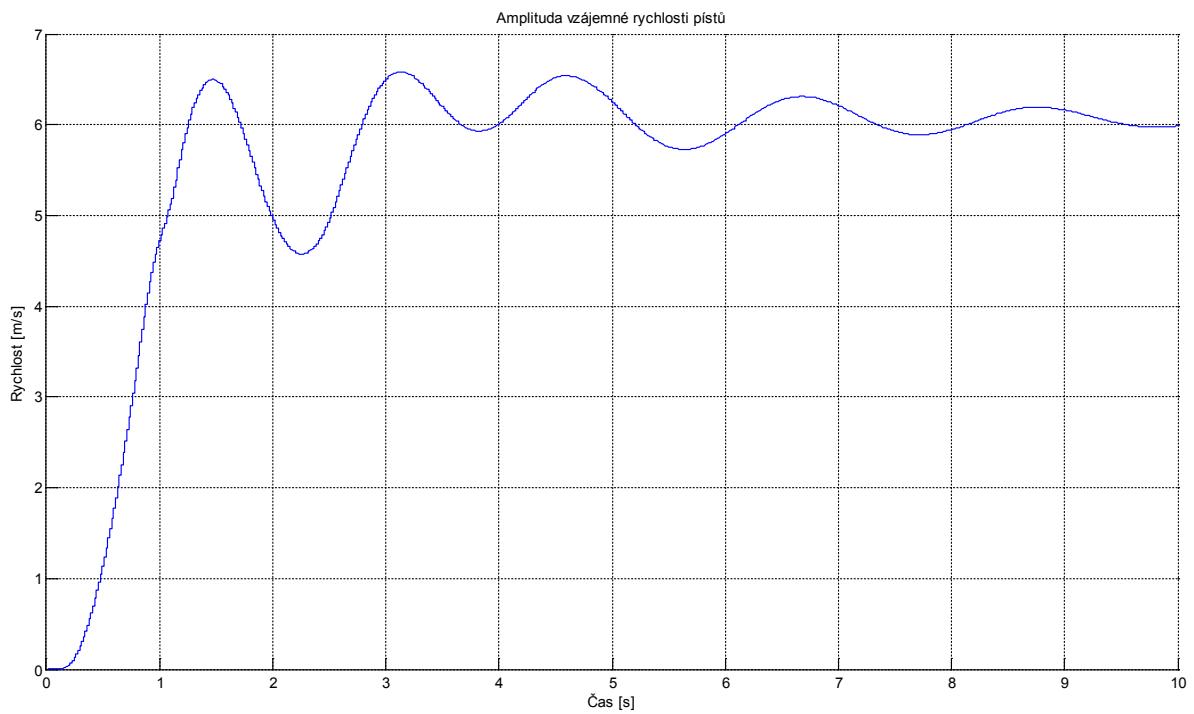
Amplituda vzájemné rychlosti pístů

Rozběhová síla

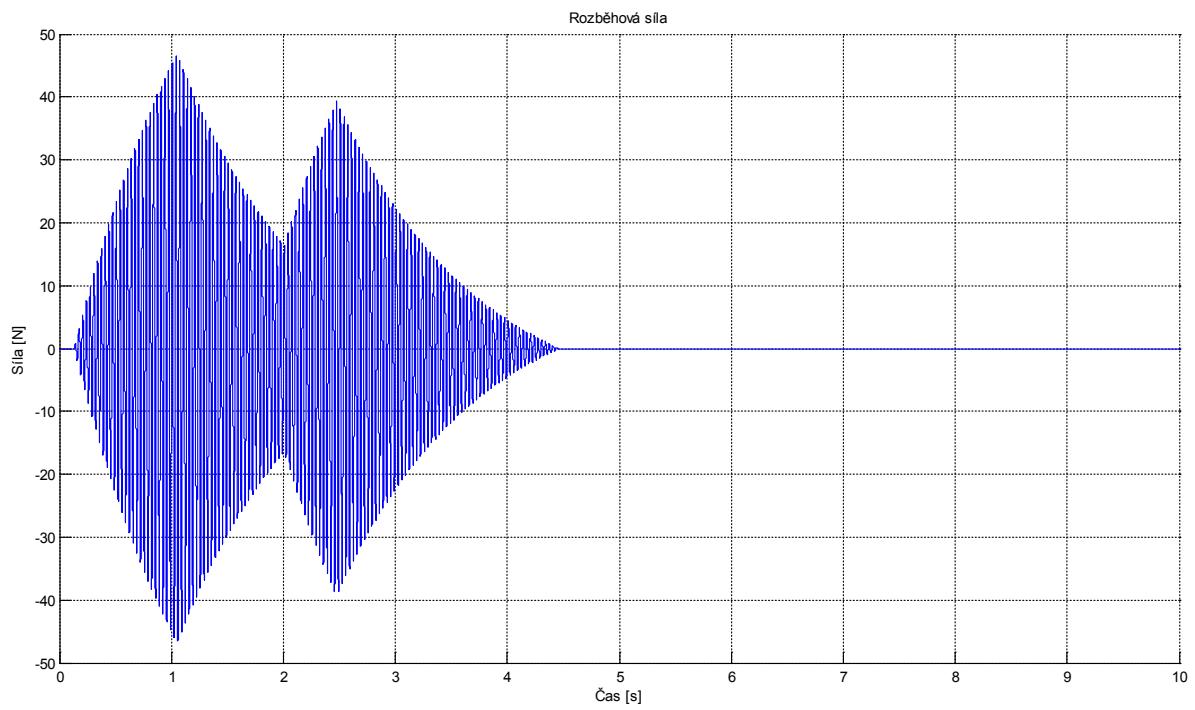
Čas přípravy paliva



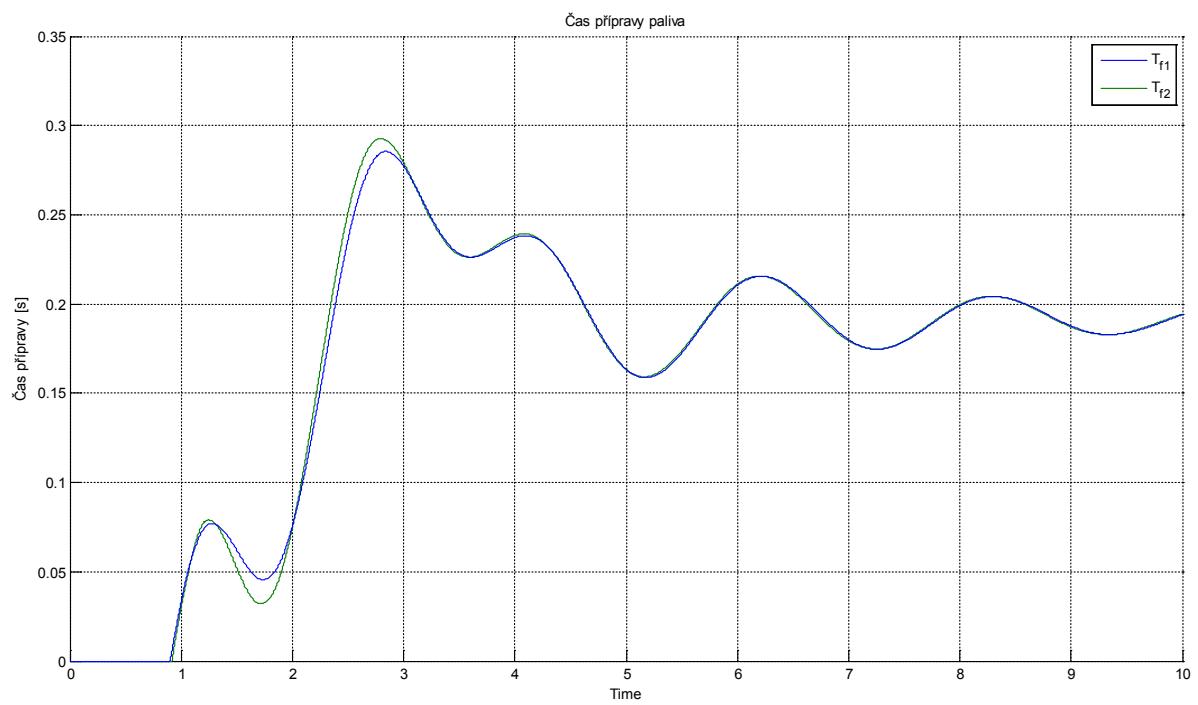
Obrázek C.1: Amplituda vzájemné polohy pístů



Obrázek C.2: Amplituda vzájemné rychlosti pístů



Obrázek C.3: Rozběhová síla



Obrázek C.4: Čas přípravy paliva

Příloha D

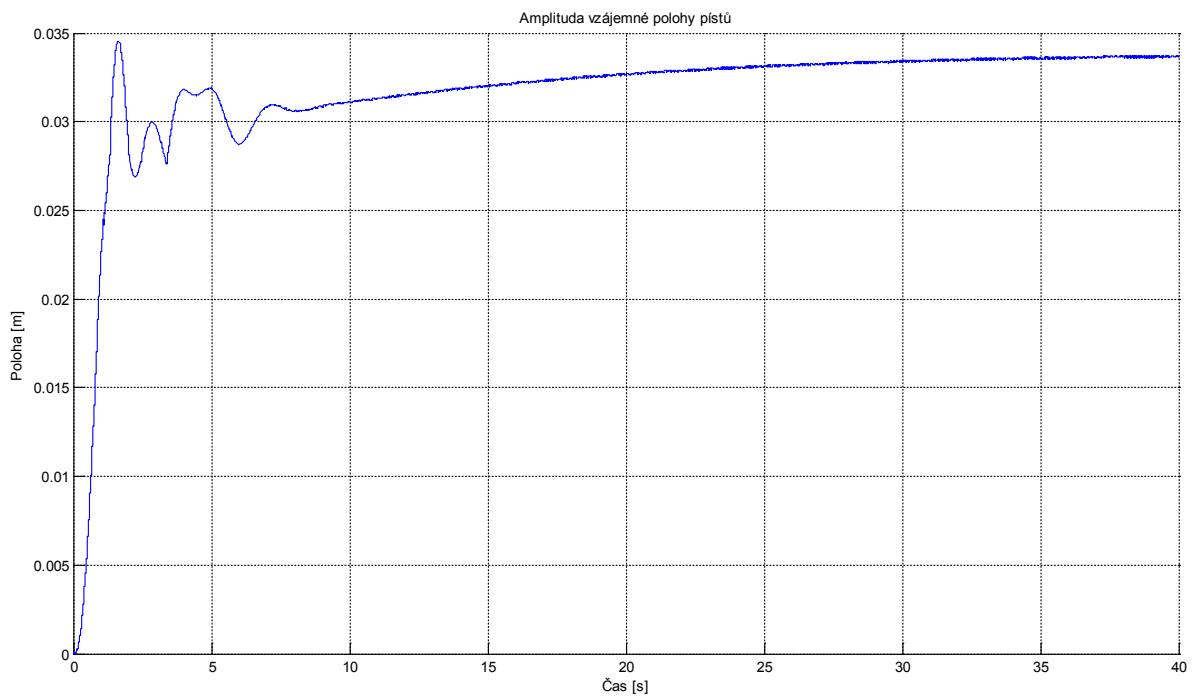
Simulace nové koncepce – brzdění motoru elektrickým motorgenerátorem

Amplituda vzájemné polohy pístů

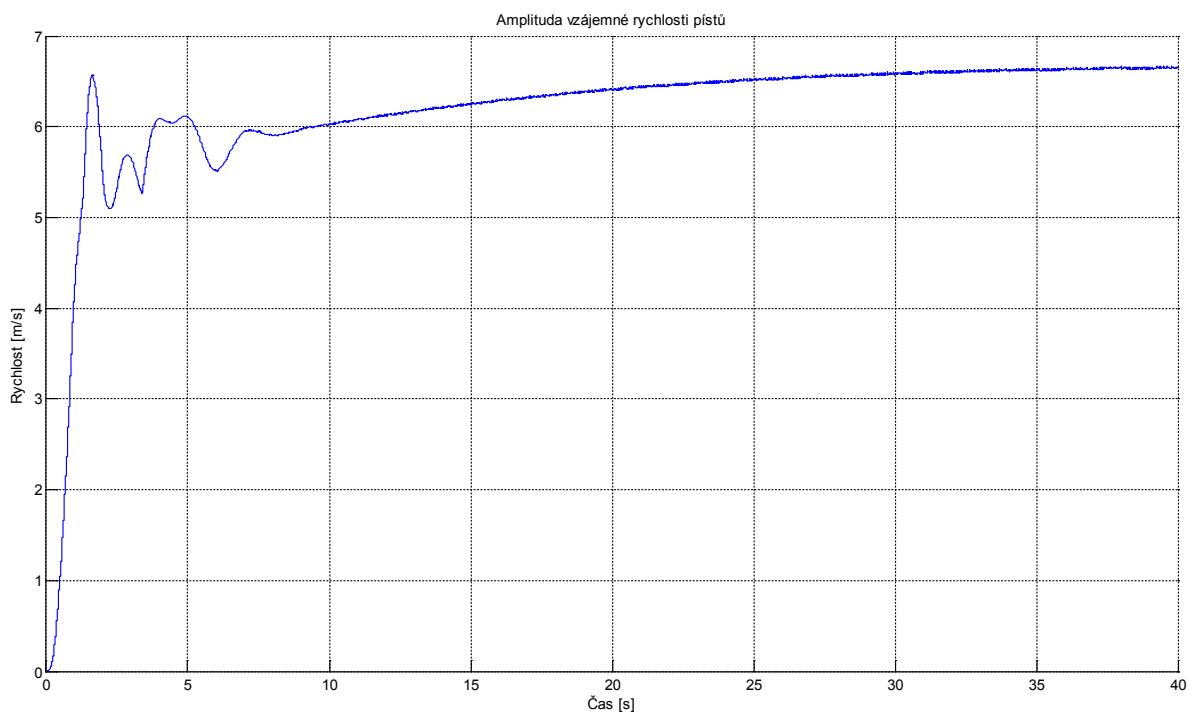
Amplituda vzájemné rychlosti pístů

Brzdící síla

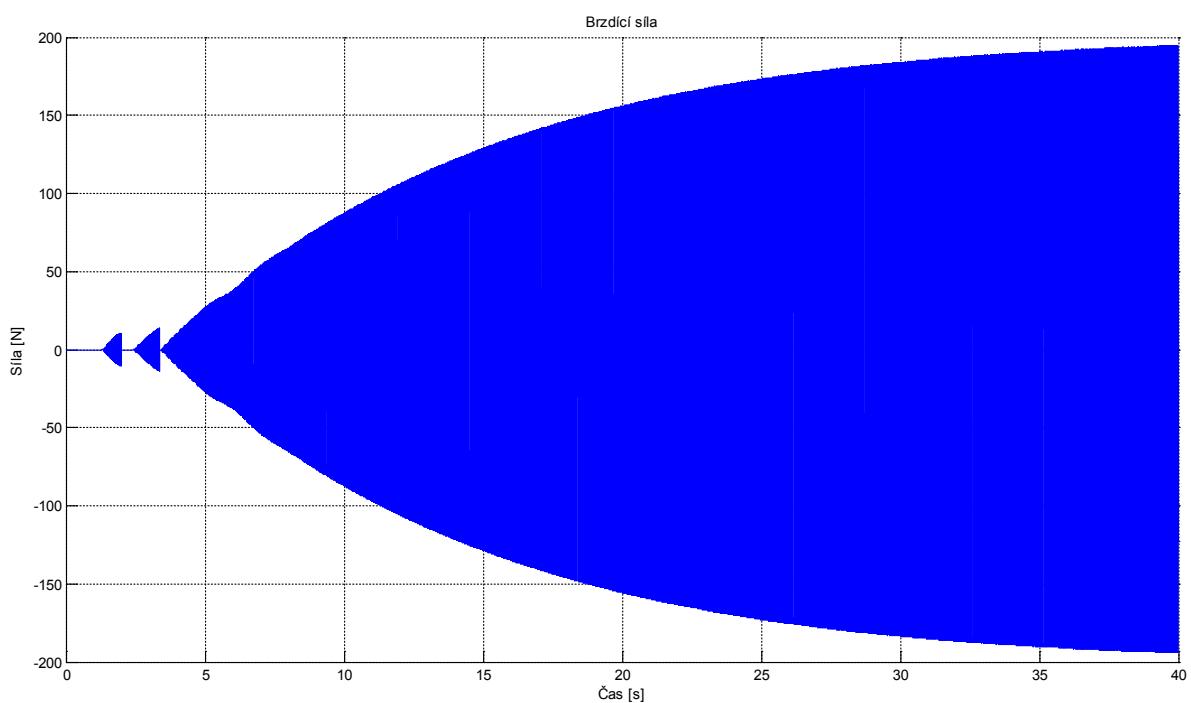
Čas přípravy paliva



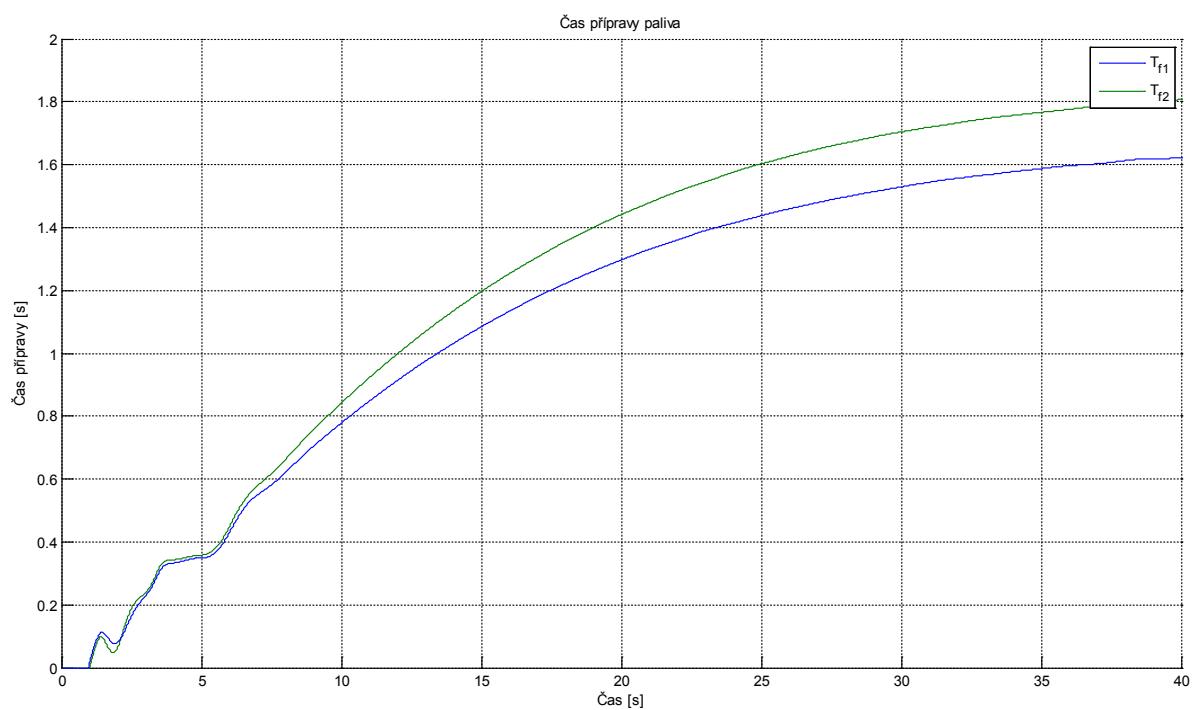
Obrázek D.1: Amplituda vzájemné polohy pístů



Obrázek D.2: Amplituda vzájemné rychlosťi pístů



Obrázek D.3: Brzdící síla



Obrázek D.4: Čas přípravy paliva

Příloha E

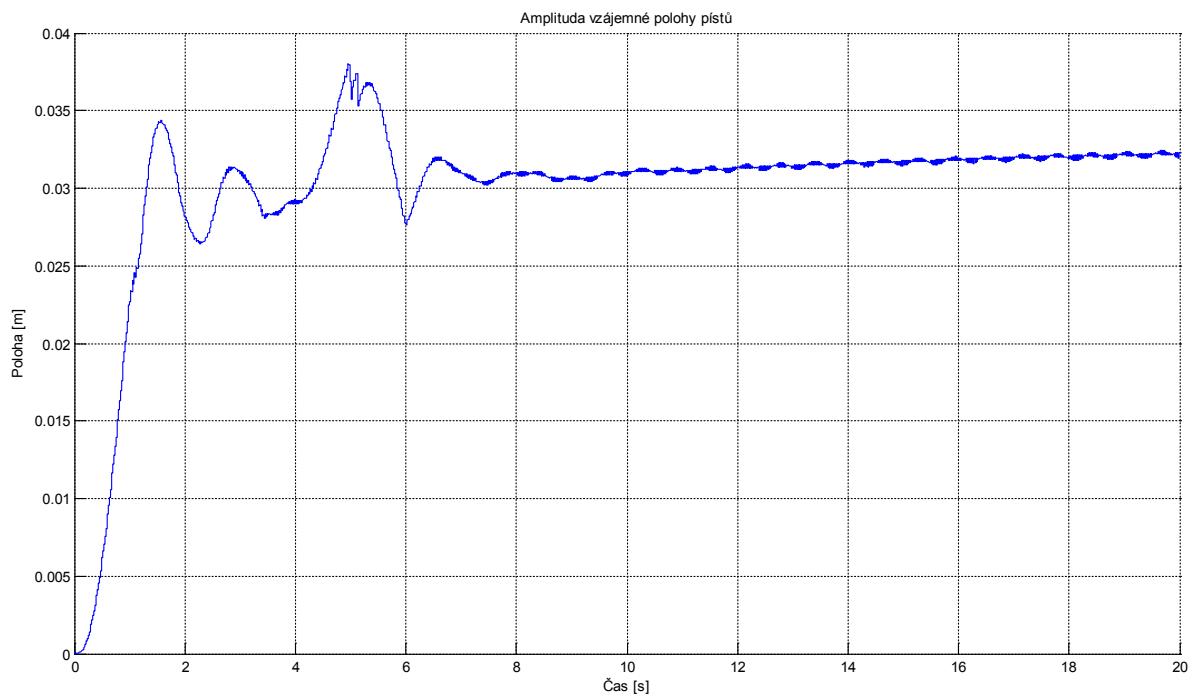
Simulace nové koncepce – příklad poruchy – nestálá tuhost pružiny

Amplituda vzájemné polohy pístů

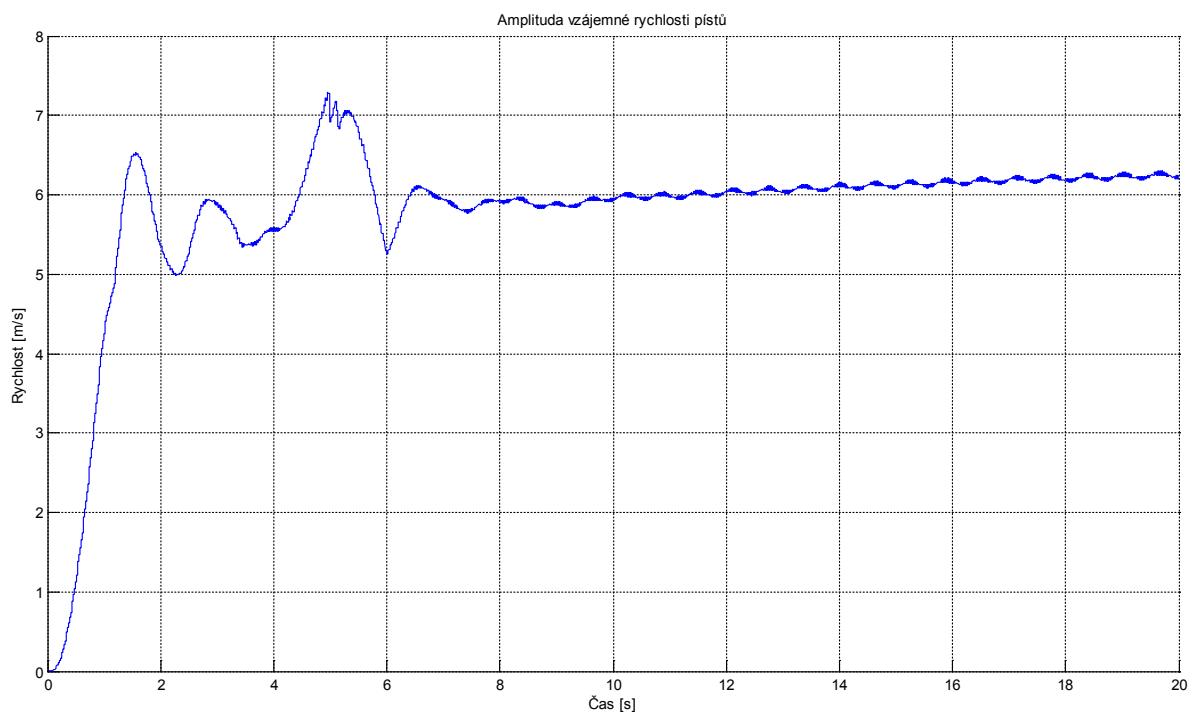
Amplituda vzájemné rychlosti pístů

Tuhost pružiny

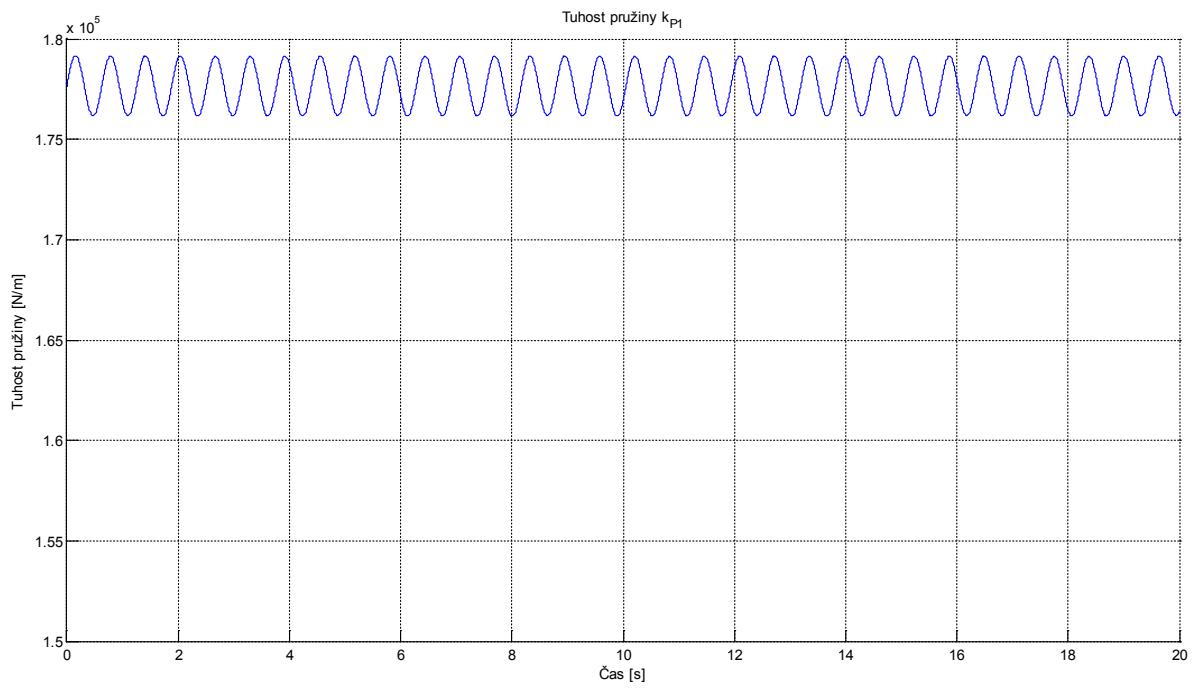
Čas přípravy paliva



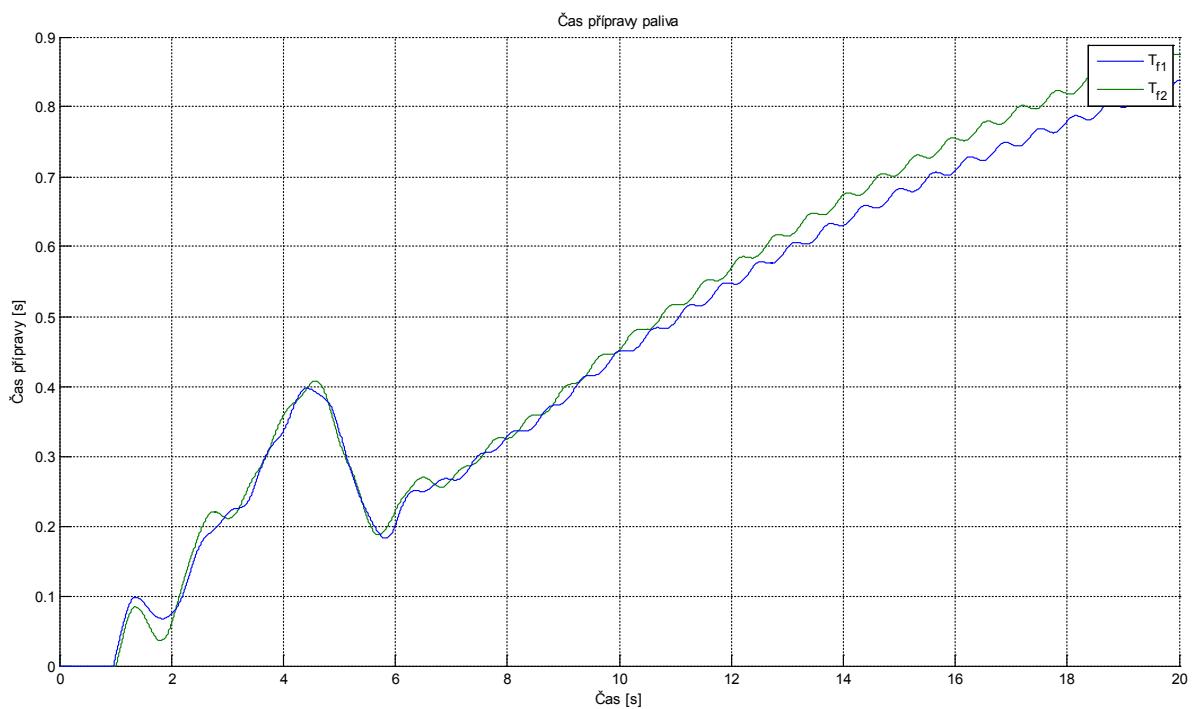
Obrázek E.1: Amplituda vzájemné polohy pístů



Obrázek E.2: Amplituda vzájemné rychlosťi pístů



Obrázek E.3: Tuhost pružiny k_{P1}



Obrázek E.4: Čas přípravy paliva