České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra řídicí techniky

Diplomová práce

Model a řídící algoritmy pro lineární spalovací motor

Josef Jeřábek

2005

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou diplomovou práci zpracoval samostatně s přispěním vedoucího diplomové práce a používal jsem pouze literaturu v práci uvedenou. Prohlašuji, že nemám námitek proti využití výsledků této práce fakultou ani proti zveřejňování nebo půjčování se souhlasem vedoucího diplomové práce.

Poděkování

Tato práce by nevznikla bez pomoci, cenných rad, podmětů a připomínek vedoucího diplomové práce Doc. Ing. Ondřeje Vysokého, CSc. a celého jeho výzkumného týmu.

Můj vděk patří také všem, kteří mě při práci podporovali i jinak než odbornými radami.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá lineárním spalovacím motorem, jeho modelováním a řízením. Lineární spalovací motor přeměňuje chemickou energii kapalného paliva na eletrickou energii. Skládá se z lineárního elektromotoru a dvou spalovacích motorů, vše uloženo v jedné ose. Pohyb motoru je posuvný a ne rotační, jak je tomu u současných agregátů. Motor je vyvíjen s vidinou využití v hybridních automobilech, jako zdroj relativně čité energie s vysokou účinností. Jeho výhodou je mechanická jednoduchost a z toho plynoucí dlouhá životnost. Činnost modelu i algoritmů řízení je zkoumána na vytvořeném modelu motoru a následně porovnána s reálnými výsledky naměřenými na funkčním prototypu.

Abstract

This diploma thesis deals with model and control of linear combustion engine. Linear combustion engine transform chemical energy of petrol to electric energy. It consist of linear electromotor and two combustion engines in one center line. The engine moves from one to an other side. There is no turning there. This type of engine can be used in the future for hybric vehicles. Because of his efficincy and low polution. The engine is mechanicaly very simple. That can be the reason for long durability. Model and control algorithms are tested on created model of engine and compared with real prototype results.

Obsah

1 Úvod **1**
1.1 Současné agregáty . . . 1
1.2 Způsoby skladování energie . . . 2
1.3 Hybridní pohon . . . 2
1.3.1 Současné aplikace . . . 3
1.4 Lineární spalovací motor . . . 3

2 Základní pojmy **4**
2.1 Lineární elektromotor . . . 4
2.2 Spalovací motor . . . 5
2.3 Lineární spalovací motor . . . 6

3 Prototyp LCE **7**
3.1 Popis celkové struktury . . . 7
3.2 Popis částí LCE . . . 7
3.2.1 LM . . . 7
3.2.2 CE . . . 8
3.2.3 LCE . . . 8
3.2.4 Můstek . . . 9
3.2.5 Čidla . . . 11
3.2.6 Realtime HW & SW . . . 12
3.3 Blokové schéma řízení . . . 13
3.4 Celkové provedení . . . 13

4 Model **16**
4.1 Elektromagnetický model LM . . . 16
4.1.1 Elektromagnetický popis . . . 16
4.1.2 Simulační model . . . 21
4.1.3 Identifikace . . . 24
4.2 Termodynamický model CE . . . 25
4.2.1 Termodynamický popis . . . 25
4.2.2 Simulační model . . . 28
4.2.3 Identifikace . . . 31
4.3 Dynamika LCE . . . 33
4.3.1 Mechanický popis . . . 33
4.3.2 Simulační model . . . 33
4.3.3 Identifikace . . . 34
4.4 Model řízeného třífázového můstku . . . 35
4.5 Celkový model LCE . . . 35
4.6 Ověření modelu . . . 35

4.7 Pracovní stavy LM . . . 36
4.7.1 Buzení ve fázi . . . 37
4.7.2 Buzení mimo fázi . . . 41
4.7.3 Shrnutí buzení při konstantní rychlosti . . . 44
4.7.4 Vliv nekonstantní rychlosti . . . 44

5 Řízení **45**
5.1 Úkoly a části řízení . . . 45
5.2 Obecné schéma řízení pohybu . . . 45
5.2.1 Komutátor . . . 46
5.2.2 Budič . . . 48
5.3 Řízení síly . . . 49
5.3.1 Základní regulátor . . . 49
5.3.2 Regulátor dle indukovaného napětí . . . 51
5.3.3 Regulátor s vektorovým řízením . . . 51
5.4 Řízení pohybu . . . 54
5.4.1 Popisy pohybu . . . 54
5.4.2 Regulátor $v(x)$ . . . 56
5.4.3 Regulátor $x(t)$ . . . 57

6 Výsledky **61**
6.1 Regulátory pohybu . . . 61
6.2 Regulátory síly . . . 61
6.3 Regulátory umožňující provoz LCE . . . 61

7 Závěr **63**

Literatura **63**

Seznam obrázků

1.1 Měrné energie a výkony různých forem uskladnění energie. 2
1.2 Hybridní automobil Toyota Prius. 3

2.1 Analogie rotačního a lineárního elektromotoru, tubulární LM. 4
2.2 Obecné schéma LCE: 6

3.1 Schéma provedení LM. 8
3.2 Celkové schéma LCE. 9
3.3 Zapojení jedné větve (ze tří) můstku. 10
3.4 Činnost můstku. 10
3.5 Step-up funkce. 11
3.6 Inkrementální čidlo LMIX. 11
3.7 Čidlo proudu LTSR-25NP. 12
3.8 Čidlo tlaku GU21D. 12
3.9 Schéma celkového řízení LM. 14
3.10 Celkové provedení LCE. 14

4.1 Magnetické pole rotoru LM. 17
4.2 Uspořádání LM. 17
4.3 Elektrické schéma motoru připojeného na třífázový zdroj napětí. . . . 19
4.4 Elementární obvod. 19
4.5 Vodiče cívky v magnetickém poli. 20
4.6 Silové poměry v LM. 21
4.7 Bloček modelující LM. 22
4.8 Struktura bločku modelujícího LM. 22
4.9 Struktura bločku modelujícího indukované napětí. 23
4.10 Struktura bločku modelujícího impedanci cívky statoru. 23
4.11 Struktura bločku modelujícího silové účinky proudu. 24
4.12 Průběh wiebeho funkce hoření a její derivace. 26
4.13 Simulační model spalování. 29
4.14 Schéma modelu spalování. 29
4.15 Schéma modelu vývinu tepla. 29
4.16 Schéma modelu pily pro model vývinu tepla. 30
4.17 Model termodynamické síly hoření. 30
4.18 Schéma modelu termodynamické síly. 31
4.19 Simulační průběh při buzení CE. 32
4.20 Bloček modelující dynamiku LCE. 34
4.21 Schéma modelu dynamiky LCE. 34
4.22 Celkový model LCE. 35
4.23 Schéma celkového simulačního modelu. 36
4.24 Schéma budiče pro ověření činnosti LM. 36

4.25 Elektrický příkon a síla v závislosti na k. 39
4.26 Fázorové diagramy cívky LM. 39
4.27 Průběhy výkonu a síly na v a k. 40
4.28 Graf závislosti výkonu na k a φ_U, s a bez zanedbání L. 42
4.29 Graf závislosti vyrobeného výkonu na k a φ_U, s a bez zanedbání L. . 42
4.30 Graf průběhu výkonu v závislosti na k a parametru L. 43
4.31 Závislost mezní hodnoty k_M na úhlu impedance. 44

5.1 Obecné schéma řízení pohybu. 46
5.2 Bloček Komutátor. 46
5.3 Bloček Komutátor. 47
5.4 Ověření činnosti komutátoru. 48
5.5 Bloček 3-fázového budiče. 48
5.6 Schéma 3-fázového budiče. 49
5.7 Bloček základního regulátoru síly. 49
5.8 Schéma základního regulátoru síly. 50
5.9 Ověření klasického regulátoru síly - přechodvý děj. 50
5.10 Ověření klasického regulátoru síly - harmonické buzení. 50
5.11 Prostorový vektor proudu. 52
5.12 Transformace ze souřadnic (a, b, c) do souřadnic (α, β). 52
5.13 Transformace ze souřadnic (α, β) do souřadnic (d, q). 53
5.14 Regulátor s vektorovým řízením. 53
5.15 Schéma regulátoru s vektorovým řízením. 54
5.16 Schéma bločku určení fáze proudu. 55
5.17 Referenční a skutečný průběh regulátoru $v(x)$. 56
5.18 Regulátor polohy typu $v(x)$. 56
5.19 Struktura regulátoru polohy typu $v(x)$. 57
5.20 Simulační a reálné průběhy regulátoru $v(x)$. 57
5.21 Regulátor polohy typu $x(t)$. 58
5.22 Struktura regulátoru polohy typu $x(t)$. 58
5.23 Simulační a reálné průběhy s regulátorem $x(t)$ bez spalování. 59
5.24 Funkce implementované převodními tabulkami. 59

7.1 Struktura přiloženého CD-ROM. 65
7.2 Průběhy při napětí 35V. 66
7.3 Průběhy při napětí 50V. 67
7.4 Výsledky naměměřené na prototypu. 68
7.5 Výsledky nasimulované. 69

Seznam tabulek

3.1 Základní parametry LM. 8

4.1 Tabulka velikosti jednotlivých konstant modelu LM. 24
4.2 Tabulka hodnot parametrů modelu termodynamiky. 32
4.3 Tabulka režimu činnosti LM v závislosti na k. 41

Kapitola 1

Úvod

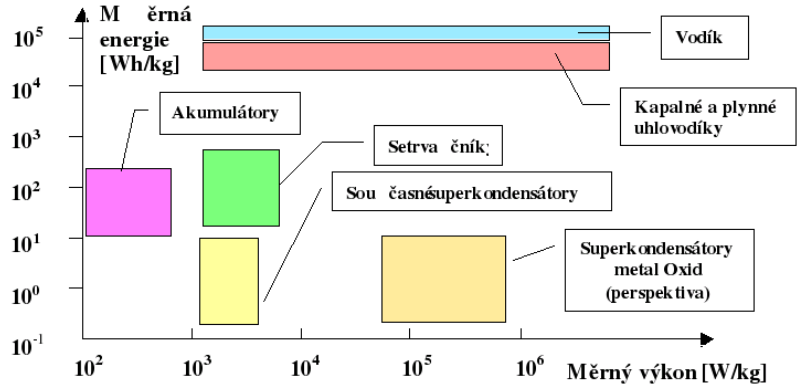
V této první kapitole pojednám o současném stavu v oblasti dopravy. O jejich součastných problémech a o problémech předvídaných. Proberu součastné pohonné jednotky silničních dopravních prostředků. Pojednám o jejich problémech a výhodách, možnostech a perspektivách. Dostanu se k tzv. hybridním pohonům, nastíním jejich problematiku a ukážu čím může tato práce přispět k jejich rozvoji.

1.1 Současné agregáty

Již dlouhou dobu vzrůstají energetické potřeby člověka. Největší měrou vzrůstají tyto potřeby v dopravě a v ní hlavně v automobilové dopravě. Ta nyní představuje největšího znečišťovatele ovzduší a životního prostředí celkově. Je to dáno velkým množstvím automobilů, tedy množstvím pohonných pohonných jednotek malých výkonů. Pohonné jednotky malého výkonu mají obecně menší účinnost než je tomu u pohonných jednotek velkého výkonu. Hlavní rozdíl je ale v rozsahu použití jednotek malého výkonu oproti těm s velkým výkonem. Jako příklad poslouží srovnání nákladního kamionu a osobního automobilu, oba s dieslovým motorem.

Nákladní automobil má obvykle šetnácti stupňovou převodovku, a při plném naložení řidič využívá všechny stupně. Naproti tomu automobil má typicky pět rychlostních stupňů. Typická spotřeba kamionu se pohybuje kolem litru na stokilometrů na jednu tunu. Osobní automobil typicky váží jednu tunu a jeho spotřeba se pohybuje kolem čtyř litrů. Přestože jsem uvedl velmi odlišné příklady užití pohonné jednotky a uplatňuje se zde mnoho dalších okolností jako odpor vzduchu ap., je rozdíl účinností (spotřeby) markantní. Rozdíl je dán především pracovním rozsahem motoru. Motor kamionu beží díky mnohastupňové převodovce ve velmi úzkém rozsahu otáček - v optimu. Motor automobilu pracuje ve velkém otáčkovém rozsahu a proto často mimo své optimum.

Dále uvážme ješte režim volnoběhu. Tomu odpovídá stále častější čekání a popojíždění v koloně. V tomto režimu funguje motor naprosto mimo své optimum a nedodává žádný užitečný výkon. Zdá se tedy, že v oblasti agregátů automobilů je dost prostoru ke zlepšení. Uvážím-li omezenost zásob ropy a jejich předpokládané vytěžení v blízkém časovém horizontu, tak je nejvyšší čas zabývat se zvyšováním účinnosti motorů a pohyny alternativními.



Obrázek 1.1: Měrné energie a výkony různých forem uskladnění energie.

1.2 Způsoby skladování energie

Než se dostanu k alternativním pohoným jednotkám, tak zmíním otázku skladování energie. Zabýváme se agregáty pro dopravní prostředky a každy dopravní prostředek si musí vézt s sebou energii na cestu. Možností skladování energie je mnoho. Současné spalovací agregáty si vezou energii uskladněnou v chemické formě. Tato forma je velice výhodná - viz graf na obrázku 1.1. Graf porovnává různé způsoby uskladnění energie ve formě chemické, elektrické a mechanické. Měrná energie je úměrná dojezdu vozidla, měrný výkon jeho akceleraci.

Z grafu jednoznačně vyplývá, že chemická energie vede a ostatní formy uskladnění zaostávají. Propastný rozdíl v měrné energii uskladněné jako elektrické a chemické je největší překážkou rozvoje elektromobilů a nyní se zdá, že větší perspektivu mezi "čistými" pohony má vodík.

1.3 Hybridní pohon

Hybridní pohon vychází z faktu, že současné spalovací motory jsou neefektivně využívány ale zároveň používají palivo s vysokou měrnou energií. Neefektivita užití vychází z proměnností zatížení motoru. Tuto proměnnost řeší tzv. hybridní pohon.

Vozidlo s hybridním pohonem je vybaveno generátorem, akumulátorem elektrické energie a elektromotorem. Generátor akumuluje energii v akumulátoru v době kdy je spalovací motor málo zatížen (typ. volnoběh, brždení). Eletromotor pomáhá v případě akcelerace, odebírá při tom energii z akumulátoru. Hybridní vozidla se dělí na

- *paraelní* - Vychází z klasického uspořádání vozidla, kdy spalovací motor je přes převodovku připojem na kola. Navíc je zde motorgenerátor připojený paraelně (stejná hřídel, stejné otáčky) ke spalovacímu motoru. Motorgenerátor je přes měnič připojem na akumulátor a dle potřeby se chová jako motor nebo generátor a tím odstraňuje výkonové špičky spalovacího motoru.

- *sériová* - Spalovací motor pohání jen a pouze generátor, ten vyrábí el. enegii. Kola jsou napojena na hnací motorgenerátor, ten spotřebovává část vyrobené energie generátoru, nebo v případě brždění také vyrábí. Zbylá energie jde do akumulátoru, který vyrovnává výkonové špičky.

Obrázek 1.2: Hybridní automobil Toyota Prius.

1.3.1 Současné aplikace

V současné době je v sériové vyrobě několik hybridních automobilů jsou jimy kupř. Honda Civic Hybrid nebo Toyota Prius. Pro představu zmíním několik parametrů Toyty Prius, vycházet budu z [10]. Toyota Prius (viz. obr. 1.2) je vyráběna od roku 1997. Teprve v roce 2000 došlo k jejímu uvedení na evropský a americký trh, před tím byla k dostání pouze v Japonsku. Toyota Prius je paraelní hybrid se zážehovým motorem o objemu $1498\,cm^3$ pracujícím na tzv. chudou směs. Používá akumulátor typu Ni-Cd. Zrychlí z nuly na $100\,km/h$ za $13.4s$, jeho maximální rychlost je $160\,km/h$ a kombinovaná spotřeba $5,1\,l/100km$.

1.4 Lineární spalovací motor

Sériové hybridní automobily používají agregát složený z klasického spalovacího motoru a generátoru. Spalovací motor převádí lineární pohyb pístu pomocí klikové hřídele na rotační pohyb, dochází při tom ke značnému tření válce a pístu. Tento rotační pohyb využívá generátor.

Celý agregát lze zjednodušit odstraněním rotačního pohybu. Tím se značně zmenší tření válce a pístu a zároveň ostraní předepsaná trajektorie pístu. K tomuto účelu stačí místo rotačního generátoru použí lineární. Odstraněním klikového mechanizmu dojde ke značnému zmenšení a zjednodušení agregátu, což má za důsledek jeho delší trvanlivost, daň za to je složitější řízení. Takto zjednodušený agregát se nazývá lineární spalovací motor a jeho modelováním a řízením se zabývá tato práce.

Kapitola 2

Základní pojmy

V této kapitole vysvětlím základní pojmy týkající se lineárního spalovacího motoru. Ten se skládá z lineárního elektromotoru a spalovacího motoru. Nejprve vysvětlím pojmy z oblasti obou dvou motorů a poté ukážu, jak jejich spojením vznikne lineární spalovací motor.

2.1 Lineární elektromotor

Lineární elektromotor (LM) není žádnou novinkou a je znám již několi desetiletí. Jeho výstupem je lineární neboli posuvný pohyb. LM se v praxi používá zřídka, většina elektromotorů jsou motory rotační. Nasazení lineárních motorů roste díky novým možnostem řídící techniky. Jejich typické užití je ve výrobních linkách, kde otvírají a zavírají různé klapky, posouvají materiál na krátkou vzdálenost ap. Ve výkonových aplikacích jsou známy především z rychlovlaků jezdících na magnetikých polštářích - vlaků Maglev.

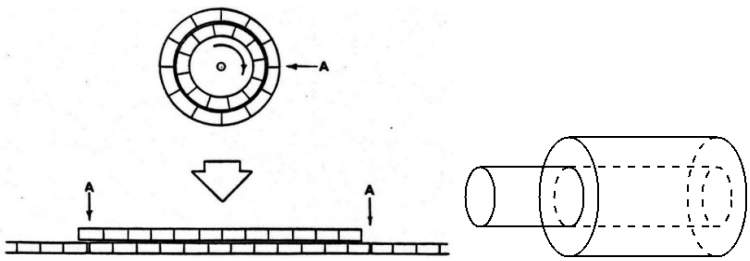
Konstrukce lineárního elektromotoru je téměř totožná s rotačním. Lineární motor vznikne pomyslných rozříznutím rotačního, jak to ukazuje obrázek 2.1 vlevo.

Na něm je také patrné jeho základní uspořádání. Dále budu předpokládat, že jeho spodní část je ukotvena a budu ji nazývat stejně jako u rotačních motorů stator, horní část bude pohyblivá a nazývat ji budu rotor.

Lineární motory v sobě zahrnují mnoho typů, dělit je můžeme dle elektrického chování na

- *stejnosměrné*
- *střídavé.*

Střídavé dále dělíme na



Obrázek 2.1: Analogie rotačního a lineárního elektromotoru, tubulární LM.

- *synchronní* - pohyb rotoru je ve fázi s pohybem pole statoru
- *asynchronní* - pohyb rotoru má skluz proti pohybu pole statoru.

Dle uspořádání cívek statoru dělíme LM na

- *tubulární* - rotor má válcový tvar a je umístěn uprostřed cívky, která tvoří stator. Schéma zachycuje obrázek 2.1 vpravo. Jejich výhodou je kompenzace sil kolmých na směr pohybu, které je nutné jinak kompenzovat v ložiskách, tak je tomu u plošných LM.
- *plošné* - rotor je plochý a pod ním je plochý stator, kde je rozloženo vinutí cívek. Takovovýto motor vznikne již zmíněným pomyslným rozbalením rotačního motoru jak je na obrázku 2.1 vlevo.

Variací LM je velice mnoho a každá je vhodná pro konkrétní aplikaci. Nejdůležitějším faktem je, že LM pracuje stejně jako rotační elektromotor a jediný rozdíl je, že se neotáčí, ale posunuje.

2.2 Spalovací motor

Spalovací motor přeměňuje chemickou energii hořením na mechanickou.

Motory dělíme dle způsobu zapálení směsi na

- *zážehové* - hořlavá směs je zápálena zapalovacím zařízením
- *vznětové* - směs se sama vznítí díky vysoké teplotě.

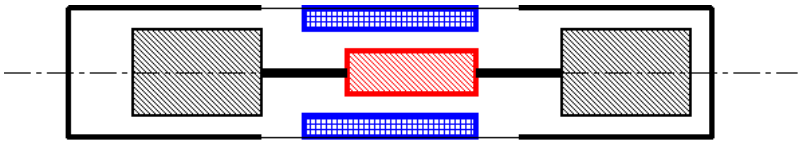
Dle pracovních cyklů dělíme motory následovně

- *dvoudobé* - pracují ve dou taktech - expanze a výfuk, sání a komprese
- *čtyřdobé* - pracují ve čtyřech taktech - sání, komprese, expanze, výfuk.

Vznětové motory používají vstřikování paliva přímo do prostoru válce již od svého vzniku. Zážehové motory starších typů používají pro přípravu směsi karburátor, z něho postupuje směs vzduchu a rozprášeného paliva do válce. Novější typy zážehových motorů také používají přímého vstřikování paliva jako motory vznětové. Tato metoda sebou nese mnohé výhody týkající se především exhalací.

Všechny dnešní spalovací motory používají pro převod posuvného pohybu pístu ojnici s klikovou hřídelí. Kliková hřídel je dále připojena na setrvačník. Díky tomuto zařízení je převeden pohyb posuvný na rotační a zajištěna jeho plynulost. Píst tam má mechnicky vymezen rozsah pohybu a je zajištěno, že nedojde k jeho kolizí s jinou části motoru - např. hlavou.

Lineární spalovací motor neobsahuje celý spalovací motor, jak byl představen, ale právě jen tu část bez setrvačníku a klikové hřídele. A je tedy zdrojem síly a následně lineárního pohybu. Takovouto část klasického spalovacího motoru budu dále myslet pod pojmem spalovací motor a budu ji značit CE jako zkratku anglického combustion engine.



Obrázek 2.2: Obecné schéma LCE:

2.3 Lineární spalovací motor

Lineární spalovací motor (LCE) je zařízení, které funguje jako dnes známe agregáty. Přeměňuje chemickou energii pohonných hmot na elektrickou. Jeho uspořádání je dáno souosím uložením lineárního elektromotru a spalovacího motoru (bez klikového mechanizmu). LM slouží jako generátor a při spouštění zařízení jako elektrický starter. Spalovací motor je zdrojem mechanické energie.

Variant uložení se nabízí více a jsou odvyslé především od toho zda jde o motor dvoudobý a nebo čtyřdobý. Vhodnější se pro tuto aplikaci zdá motor dvoudobý. Jednou z možností je jeden spalovací motor a jeden LM. Při expansi pak koná CE práci, a LM vyrábí. Komprese je realizovaná tak, že LM funguje jako motor a energii ze zdroje odebírá. Funkci LM při kompresi může v případě dvoudobého motoru nahradit pružina.

Další variantou je použití dvou dvoudobých CE s opačným směrem pohybu, mezi nimiž je LM. Pohyb na jednu stranu znamená expansi v jednom a kompresi v druhém válci, při pohybu na druhou stranu se situace ve válcích vymění. Výhodou tohoto uspořádání je, že stále jeden válec pohaní mechanizmus. Schéma takovéhoto uspořádání je na obrázku 2.2.

Černě je vyznačena část CE a barevně část LM. Modrý je stator a červený rotor. Takovéto zařízení nevyžaduje dodávání energie během pohybu. Jeho nevýhodou jsou mechanické vybrace, neboť proti pohybu rotoru nepůsobí žádná kompenzační síla, která by udržela celý LCE v klidu. Tyto vibrace by odstanilo až spojení dvou takovýchto LCE, jejichž rotory by chodily v protipohybu.

Kapitola 3

Prototyp LCE

V této kapilole popíšu zkonstruovaný testovací prototyp. Nejprve popišu celkové schéma a jeho činnost, následně rozeberu činnost jednotlivých částí a dostanu se ke struktuře řízení celku.

3.1 Popis celkové struktury

Popis funkce byl naznačen v předchozí kapitole. Nyní tuto činnost popíšu podrobně. Celý funkční prototyp se skládá ze synchronního plošného lineárního motoru, dvou dvoutaktních motorů o objemu $50\,ccm$ s přímým vstřikováním. Další součástí je řízený třífázový můstek, který je připojen přes usměrňovač na síť nebo do externího spotřebiče[1]. Ze sítě se energie odebíra, pokud se energie vyrábí, je spotřebovávána v externím spotřebiči. Řízený můstek je řízen průmyslovým počítačem s procesorem Motorola Power PC. Průmyslový počítač je propojem s pracovním počítač, který tvoří rozhraní pro řízení a komunikaci z průmyslovým počítačem.

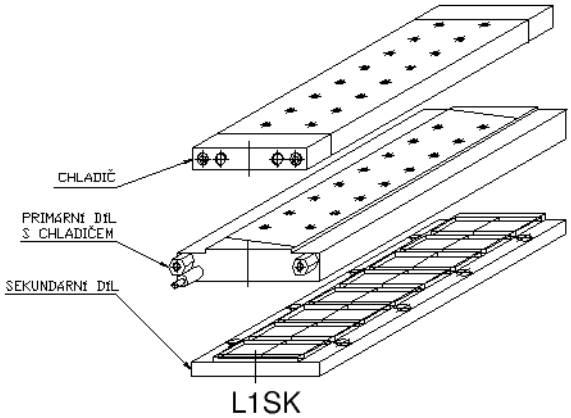
3.2 Popis částí LCE

3.2.1 LM

Lineární elektromotor je třífázový synchronního typu s rotorem z permanentních magnetů a plošným provedením. Jeho výrobcem je Brněnská firma VUES. Jedná se o typ L1SK075P-3208-JK, který je v motorickém režimu určen pro rychlosti do $2\,m\,s^{-1}$. Dle informací výrobce může být provozován v generátorovém režimu i pro značně větší rychlosti. Schéma jeho provedení je na obrázku 3.1. Jak je na obrázku vyznačeno, motor se skládá ze tří dílů. Jedná se o primární a sekundární díl a dále chladič. Pro ujasnění hned uvedu, že v našem prototypu je LM uložen obráceně - dole je chladič s primárním dílem a tyto jsou pevně připevněny ke kleci motoru. Nad nimi se pohybuje sekundární část tvořená permanentními magnety, která tvoří rotor.

Tabulka 3.1 shrnuje jeho základní a nejvýznamější paramatry, se kterými se pracuje v dalších kapilolách. Komplempletní dokumentace je v elektronické podobě na přiloženém CD-ROM (viz. Příloha A).

[1] Tak je nakládáno s energií nyní při vývoji LCE. V provozu se bude energie dodávat i odebírat z akumulátoru.



Obrázek 3.1: Schéma provedení LM.

$1700\,N$	maximální krátkodobá síla, při proudu 23A
$930\,N$	maximální trvalá síla při proudu $9,7A$ a rychlosti $2ms^{-1}$
$54\,Vms^{-1}$	napěťová konstanta
$100\,NA^{-1}$	proudová konstanta

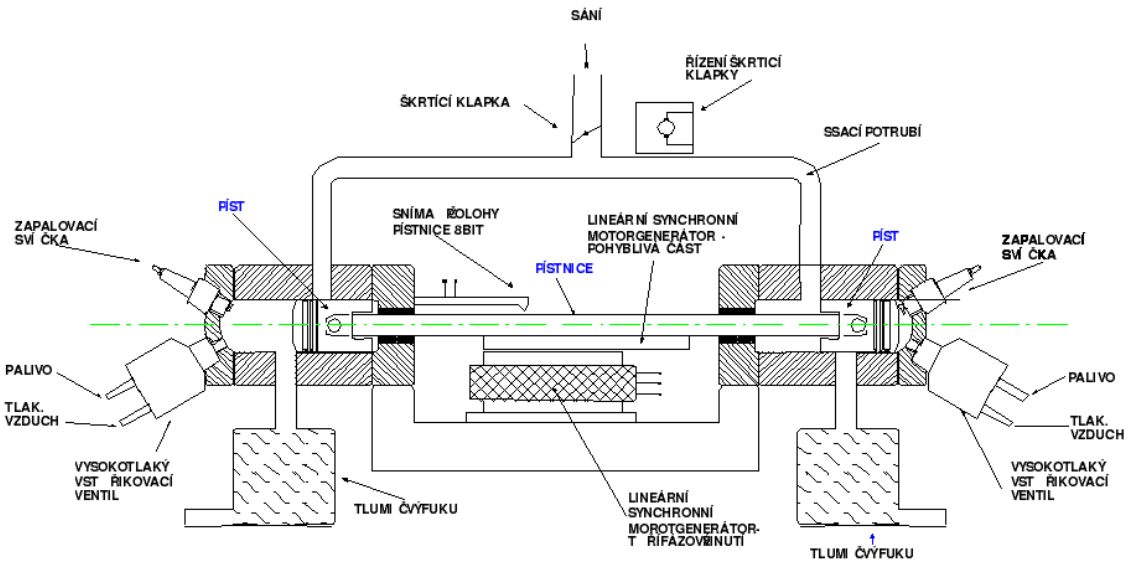
Tabulka 3.1: Základní parametry LM.

3.2.2 CE

Spalovací motory jsou od italské firmy Aprillia. Jedná se o motory, které jsou dodávány do skůtru s typovým označením Aprillia SR 50 Ditech. Jsou to dvoudobé vzduchem chlazené jednoválce s přímým vstřikováním a objemem $50\,ccm$. Více informací viz. [9]. Motor používá vstřikovací technologii Ditech a díky ní patří k nejlepším ve své třídě. Technologie Ditech představuje vstřikování do pomocné komory za pomoci stlačeného vzduchu. Stlačený vzduch vyrábí kompresor, bez kterého motor nefunguje. Palivo je nejprve vstříknuto do komory, kde dochází k jeho smísení se vzduchem. Vstříknutím je rozbito na částečky o velikosti 8 mikronů a rovnoměrně rozmícháno se vzduchem. Za pomoci stlačeného vzduchu je poté ve vhodný okamžik vstříknuto do spalovacího prostoru, který je vyplachovám samotným vzduchem. Tato technologie umožňuje dokonalejší spálení paliva, tím zvyšuje účinnost a eliminuje nežádoucí vlastnosti běžných dvoudobých motorů. Zároveň dramaticky snižuje emise. Průměr motoru je 40mm a zdvih 39mm. Prostor pod pístem je řešen jako komora o přibližně stejně velkém objemu jako byl v originálním motoru. Tam byl jeho objem dán velikostí klikového mechanismu. V případě našeho použití je možnost tento prostor zmenšit až na hodnotu rovnou objemu motoru. Jeho ideální velikost je ale práce pro termodynamického specialistu.

3.2.3 LCE

Celkové schéma LCE zachycuje obrázek 3.2. Válce CE a stator LM jsou připevněny na nosnou konstrukci motoru. Písty jsou souose propojeny pístnicí, na které je připevněn rotor LM. Polohu pístnice snímá inkrementální magnetické čidlo polohy a optické kalibrační čidlo polohy, o nich pojednám dále. Sací potrubí vede přes řízenou klapku a poté se rozděluje do jednotlivých válců. Výfukové potrubí je



Obrázek 3.2: Celkové schéma LCE.

poté vyvedeno do společného tlumiče. V hlavě každého válce je zapalovací svíčka a zařízení přímého vstřikování.

Princip funkce je následující. Pokud dojde na jedné straně k zapálení směsi, je celá pohyblivá část motoru (rotor LM, pístníce a písty) unášena k druhé straně, práci koná CE dané strany, kde došlo k výbuchu. V druhém CE dochází ke kompresi. LM přitom pohyb brzdí, odebírá z pohyblivé části mechanickou energii a přeměňuje ji na elektrickou. Když se pohyblivá část dostane dost daleko, dojde k zapálení směsi v druhém válci. Nyní koná práci tento válec a v druhém dochází k výfuku a následné kompresi. Celý děj se tak neustále opakuje.

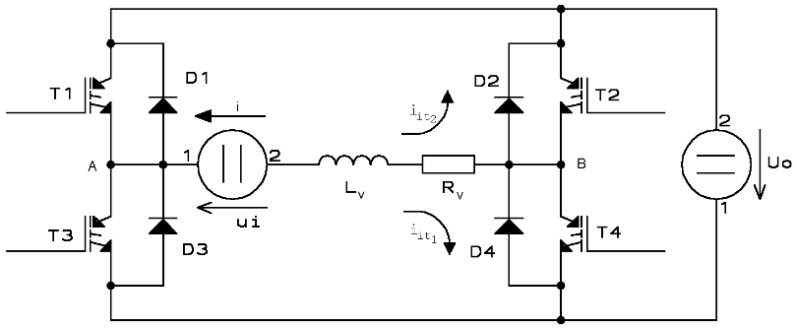
3.2.4 Můstek

Lineární motor je zapojen do H můstku podle obrázku 3.3. Jako spínací prvky jsou v něm, vzhledem k velikosti předpokládaného napětí (až 600V), použity moderní tranzistory vyrobené technologií IGBT sdružující v sobě výhody bipolárních tranzistorů i unipolárních tranzistorů MOS. Z vlastností bipolárních tranzistorů je to schopnost spínat vysoká napětí (až řádu tisíců voltů) a z vlastností tranzistorů MOS je to napěťový způsob řízení. Pro účel tvorby tohoto modelu lze tyto tranzistory považovat za ideální spínací prvky. Takto postavený H můstek umožňuje jak řízený motorický tak i generátorický režim.

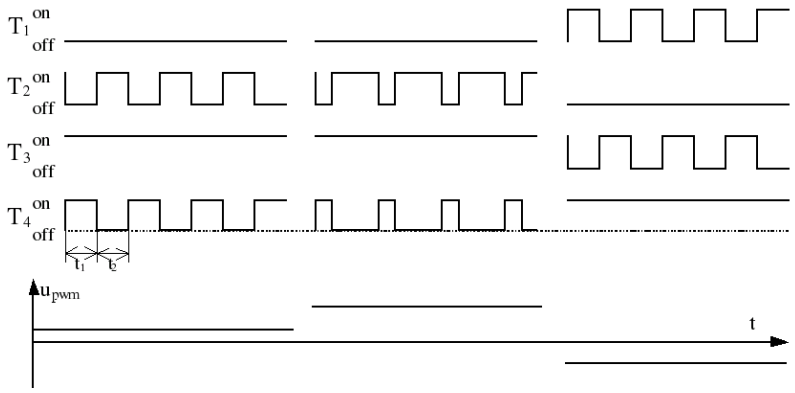
Napětí u_m žádané velikosti je na lineárním motorgenerátoru vytvářeno za pomoci pulsní šířkové modulace (PWM) jako střední hodnota pravoúhlého průběhu. V H můstku, sloužícím jako PWM modulátor, existuje několik způsobů spínaní tranzistorů. Zde zvolený způsob spínaní tranzistorů je, pro různé hodnoty u_{PWM}, zachycen na obr. 3.4. V případě, že je žádáno kladné u_m v orientaci naznačené na obr. 3.3, je tranzistor T_3 trvale sepnut a tranzistory T_2 a T_4 se střídavě spínají. Pro opačnou orientaci u_m je trvale sepnut tranzistor T_4 a střídavě se spínají tranzistory T_1 a $T3$.

Výslednou střední hodnotu napětí u_m lze vyjádřit jednoduchým vztahem

$$u_m = \frac{t_2}{t_1 + t_2} U_0 \, sign(u_{PWM})$$



Obrázek 3.3: Zapojení jedné větve (ze tří) můstku.

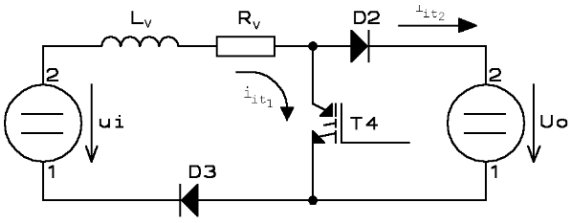


Obrázek 3.4: Činnost můstku.

Napětí u_m může nabývat hodnot z intervalu $(-U_0, U_0)$. Převodní charakteristika PWM modulátoru je tedy lineární se saturací hodnotami $-U_0$ a U_0.

Primárním cílem je však využití generátorického režimu, při kterém je třeba zajistit přenos energie ze zdroje indukovaného napětí u_i do zdroje napětí U_0. Napětí U_0 je však vyšší než hodnoty napětí, kterých nabývá indukované napětí u_i. Je proto třeba zajistit jeho transformaci směrem k vyšším hodnotám. K tomu lze s výhodou využít vlastní indukčnosti vinutí lineárního motoru a vhodným řízením spínacích prvků můstku dosáhnout režimu jeho funkce ekvivalentnímu takzvanému step-up konvertoru (zvyšujícímu zdroji napětí), známému z teorie spínaných zdrojů. Pro vysvětlení činnosti H můstku jako step-up konvertoru překreslíme schéma z obrázku 3.3 na jednodušší platné pro naznačenou polaritu indukovaného napětí u_i. Při naznačené situaci se neuplatní tranzistory T_1 (cíleně rozpojen), T_2 a T_3 (v daném případě polarizovány v závěrném směru) a diody D_1 a D_4. Dioda D_3 je v tomto režimu trvale otevřena. Tranzistor T_4 a dioda D_2 jsou aktivními prvky step-up konvertoru. Vpřípadě opačné polarity indukovaného napětí u_i je využití spínacích prvků stranově převrácené proti zmíněnému. Zjednodušené schéma je zachyceno na obrázku 3.5.

Princip činnosti takto získaného step-up konvertoru je následovný: během časového úseku t_1 kdy je tranzistor T_4 otevřen prochází smyčkou tvořenou L, R, T_4, D_3 a zdrojem indukovaného napětí proud i_{it1}, vyvolaný účinkem indukovaného napětí u_i. Tento proud s časem narůstá. Zároveň je během této doby v indukčnosti vinutí L ukládána energie. Po uplynutí časového úseku t_1 se tranzistor T_4 zavírá. Vzhledem ktomu, že na indukčnosti není možná diskontinuita proudu dochází na indukčnosti L k indukování napětí ve smyslu opačném kesmyslu procházejícího proudu, následkem



Obrázek 3.5: Step-up funkce.

Obrázek 3.6: Inkrementální čidlo LMIX.

čehož dojde k otevření diody D_2 a proud začne procházet v naznačeném smyslu i_{it2} do zdroje U_0, kde koná práci. Porovnáním zmíněného principu s obrázkem 3.4 je vidět, že na obrázku zachycený způsob řízení přenos energie zmotorgenerátoru do zdroje umožňuje a záleží tedy pouze na velikosti indukovaného napětí u_i, zda-li kněmu dojde. Podmínkou přenosu energie zmotorgenerátoru do zdroje U_0 je splnění nerovnosti $u_i > u_m$.

3.2.5 Čidla

Na zkontruovaném prototypu je několik čidel na základě nichž se provádí řízení. Jsou to čidla polohy a proudu. Dále jsou ve spalovacích prostorách CE instalovány čidla tlaku. Tyto čidla neslouží pro přímé řízení, dozvídáme se z nich ale cenné informace o průběhu spalovacího procesu.

3.2.5.1 Poloha

Polohu měří dvě čidla v součinnosti. Jsou jimi inkrementální magnetické čidlo polohy a optické kalibrační čidlo. Kalibrační čidlo je tvořeno závorou a světelným řetězcem, který závora přerušuje. Výstupem tohoto čidla je hodnota 0 pokud je pohyblivá část LCE nalevo od geometrického středu nebo 1 pokud je napravo. Čidlo slouží pro kalibraci druhého čidla, které je inkrementální. Při spuštění motoru je inkrementální čidlo nakalibrováno pomocí kalibračního čidla a následně už měři polohu pouze čidlo inkrementální.

Výrobcem čidla je kolínská firma Elgo Electric, jedná se o typ LMIX (viz. obrázek 3.6). Čidlo se skládá z magnetické pásky, která je přilepena na rotoru a snímače. Ten je ukotven na klec motoru. LMIX konvertuje průběh magnetického pole pásku na signál charakteristický pro inkrementální snímače (A, B kanál o $\frac{\pi}{2}$ posunutý). Frekvence výstupního signálu je přímo úměrná rychlosti posuvu. Rozlišitelnost a opakovatelnost je $0,1\,mm$. Dokumentaci k čidlu lze nalézt na přiloženém CD-ROM (viz. příloha A).

Obrázek 3.7: Čidlo proudu LTSR-25NP.

Obrázek 3.8: Čidlo tlaku GU21D.

3.2.5.2 Proud

Proud je měřen bezkontakními čidly od firmy LEM. Měřen zvlášť proud každé fáze a dále je měřen celkový proud. Jedná čidla s typovým označením LTSR25-NP. Čidlo ukazuje obrázek 3.7. Jeho rozsah je 25A. Další parametry na přiloženém CD-ROM (viz. příloha A).

3.2.5.3 Tlaky

Otvory pro měření tlaků se nacházejí v hlavách obou válců. Jeden spalovací motor má navíc ještě ovor v podpístovém prostoru. Tlak je měřen čidly od firmy AVL, jejichž typové označení je GU21D. Dokumentaci k čidlu lze opět nalézt na přiloženém CD-ROM (viz. příloha A). Čidlo měří tlak v rozsahu 0-25 MPa, s chybou linearity ± 0.3. Maximální pracovní teplota je 400C. Čidlo ukazuje obrázek 3.8.

3.2.6 Realtime HW & SW

Celý systém je řízen průmyslovým počítačem s procesorem Motorola Power PC. Průmyslový počítač (PPC) má několik vstupních kanálů pro měření a výstupních pro řízení. Tento počítač je propojem s počítačem pracovním. Z pracovního počítače jsou nahrávany řídící programy do průmyslového a naopak z průmyslového jsou přenášena naměřená data do pracovního počítače.

Algoritmy regulátorů jsou vytvořeny jako systémy v prostředí Matlab - Simulink. Matlab je vybaven rozhraním RTI (Real-Time Interface) verze 5.0 od firmy dSpace, které umožňuje překlad simulinkového systému pro průmyslový počítač. Schéma regulátoru se pak vytvoří v Simulinku, nechá přeložit a nahrát do průmyslového počítače. Překlad neboli kompilace probíhá přímo v prostředí Matlab. Každému Simulinkovému prvku přísluší zdrojový kód. Celkový zdrojový kód pak vzniká s uvážením propojení jednotlivých prvků. Kromě klasických Simulinkových prvků jsou v RTI prvky, které představují vstupy a výstupy průmyslového počítače. Po překladu zdrojového kódu dojde k jeho nahrání a spuštění v průmyslovém počítači.

Ovlivnění konstant a přepínačů regulátorů je stejné, jako při klasických simulacích v programu Simulink. Jediným rozdílem je, že je nejprve nutno připojit se

k programu běžícímu na PPC. V praxi to znamená jedno kliknutí na tlačítko v Simulinku.

K měření průběhů slouží software Control desk developer opět firmy dSpace. V našem případě se jedná o verzi 2.5. Tento program se umí připojit k programu běžícímu na PPC a monitorovat stavy jednotlivých kanálů. Po spuštění programu Control desk je nejprve třeba načíst soubor proměnných (variable file). Tento soubor vzniká při překladu simulinkového schématu regulátoru a je jakýmsi seznamem všech výstupů všech prvků. Tento seznam načte Control desk a uživatel si pak může vybrat libovolný výstup libovolného prvku a ten měřit a zasnamenávat. Naměřené průběhy lze uložit do souboru jako proměnnou programu Matlab **.mat*. V Matlabu pak lze naměřené průběhy dále zpracovat.

Meření probíhají s frekvencí $10\,kHz$. Model regulátorů je diskrétní a je prováděn s krokem $100\,\mu s$, tedy také s frekvencí $10\,kHz$.

3.3 Blokové schéma řízení

Zatím jsem popsal jednotlivé části, nyní popíšu strukturu řízení celého LCE. Schéma celkového řízení zachycuje obrázek 3.9. Energetický management představuje řízení spalovacího cyklu. Škrtící klapkou, vstřikovacím ventilem a polohou zápalu se řídí výkon, účinnost, množství exhalací, tedy vše související se spalováním. Toto řízení reaguje na teplotu motoru, kvalitu paliva ap. Řízení probíhá v horizontu mnoha cyklů běhu motoru. Řízení pohybu pístnice je základem činnosti celku. Toto řízení ovládá napěťový zdroj s PWM modulací, tak aby se jeho chování co nejvíce přiblížilo chování zdroje proudu[2] a aby zajistilo chod při spalování, i při výpadku spalování.

Řídící smyčka spalování je pomalá a její činnost je práce pro zkušeného termodynamika. Já toto řízení naladím konstantami, tak aby celé zařízení pracovalo. Dále budu předpokládat, že to je optimální řízení spalování a budu řídit pohyb tak, aby výstupní výkon celého zařízení byl co nejvyšší. Předmětem zkoumání bude tedy řízení pohybu.

3.4 Celkové provedení

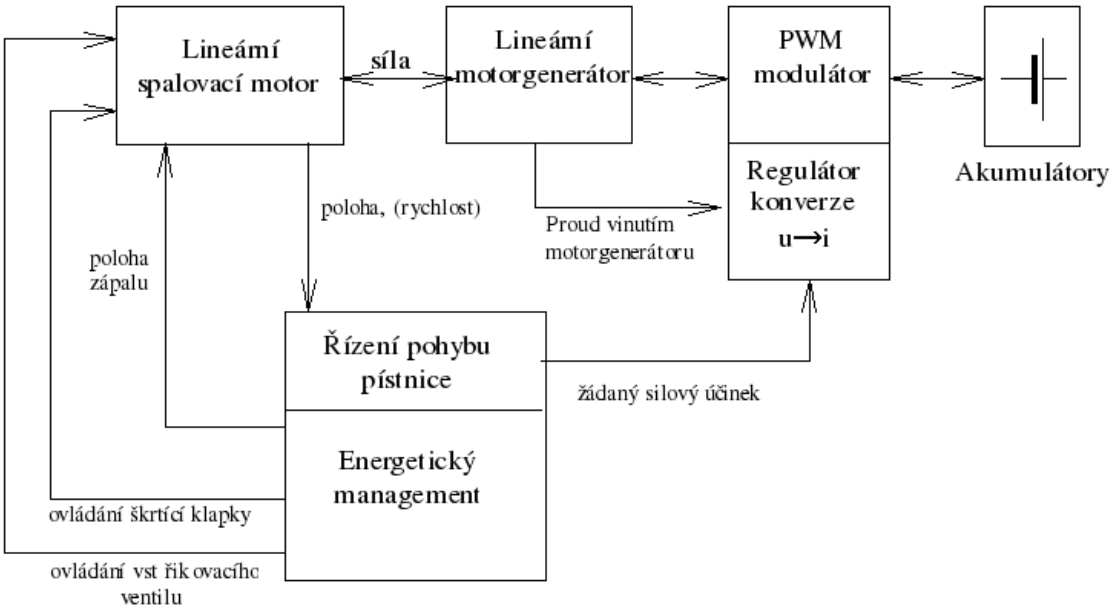
Celkové provedení LCE zachycuje obrázek 3.10. LCE je volně zavěšen na tlumičích, na kterých se pohybuje při provozu[3]. Na každé straně je jeden spalovací motor, ke kterému vede měděným potrubím přes klapku sácí potrubí. Dále na svíčky vede kabel vysokého napětí ze zapalovací cívky[4]. Dráty slouží pro řízení ventilů. K oběma hlavám dále přichází a odchází palivové hadice od palivového čerpadla umístěného v prostoru pod LCE. V jednom CE je regulátor tlaku, který slouží pro oba spalovací motory. Ten zajišťuje konstantní tlak paliva přicházejícího do systému vstřikování. Dále do hlav přichází vzduchové hadice, které přivádějí stlačený vzduch opět pro systém vstřikování paliva. Stlačený vzduch je veden od kompresoru umístěného pod LCE. Výfukový kanál každého bloku ústí do společného tlumiče.

Uprostřed je LM a nad ním na hrazdě čidlo polohy i kalibrační čidlo. Od LM vede třífázové vedení do můstku, který se nachází pod LCE. Do LM dále vedou

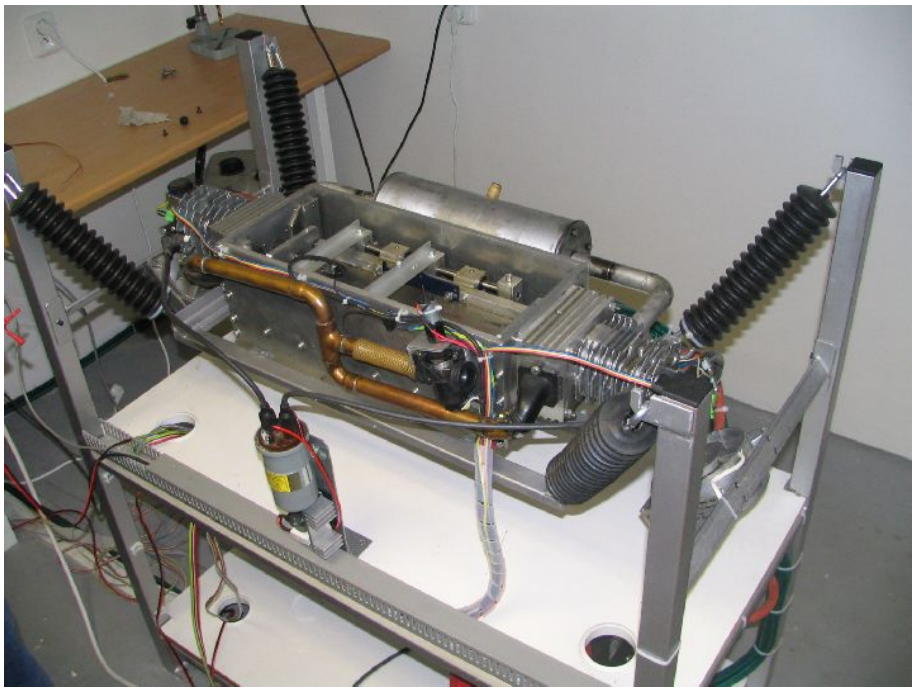
[2]Protože síla je úměrná na proudu.

[3]Jak jsem již dříve zmínil, pohyb rotoru rozpohybovává celek, neboť není protipohyb, který by udržel motor v klidu.

[4]Jedná se o dvě cívky v jednom pouzdře.



Obrázek 3.9: Schéma celkového řízení LM.



Obrázek 3.10: Celkové provedení LCE.

hadice vodního chlazení.

Počítače (průmyslový i pracovní) jsou umístěny mimo obrázek. Do průmyslového počítače vedou svazky vodiču od můstku, všech čidel a akčních členů (klapka vzduchu, vstřikování).

Kapitola 4

Model

V této kapitole popíšu všechna zařízení z nichž se stroj skládá a vytvořím jejich modely. Ty pak budu realizovat v programu Matlab/Simulink. Začnu elektromagnetickým modelem LM, v němž budu zkoumat velikost síly LM v závislosti na napětí a proudech, hmotnost pohyblivé části LM nebudu uvažovat. Poté popíšu termodynamický model spalovacího motoru. Zajímat mě bude průběh síly v závislosti na poloze a rychlosti. Opět v modelu nebudu uvažovat hmotnost pohyblivé části. V třetí sekci budu současně modelovat dynamiku LM a CE. Modelovat budu účinky termodynamické a elekromagnetické síly na rychlost a polohu motoru. Nakonec přidám model řízeného můstku přes který je LM připojen na síť.

4.1 Elektromagnetický model LM

Náš LM má rotor tvořen permanentními magnety z toho vyplývá, že se jedná o synchronní stroj. Výrobce nedává k dispozici žádné informace uspořádání cívek stroje, proto budu při jeho popisu vycházet z obecných úvah o činnosti střídavého synchronního stroje (viz. např. [1]) a znalostí magnetického pole (viz. např. [4]).

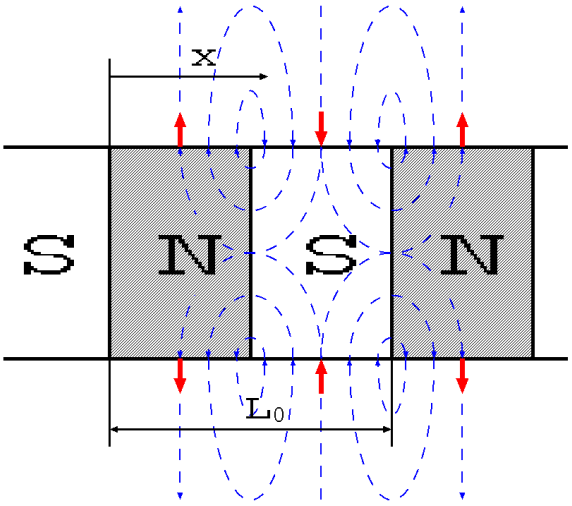
4.1.1 Elektromagnetický popis

Klasický rotační motor je tvořen dvěma částmi - rotorem a statorem. Rotor rotuje kolem své osy. Stator je pevně ukotven. V našem případě lineárního motoru nahrazuje rotaci posuv. Posouvající se část budeme dále nazývat "rotorem" a ukotvenou část "statorem", pro jasnou korespondenci s rotačními motory.

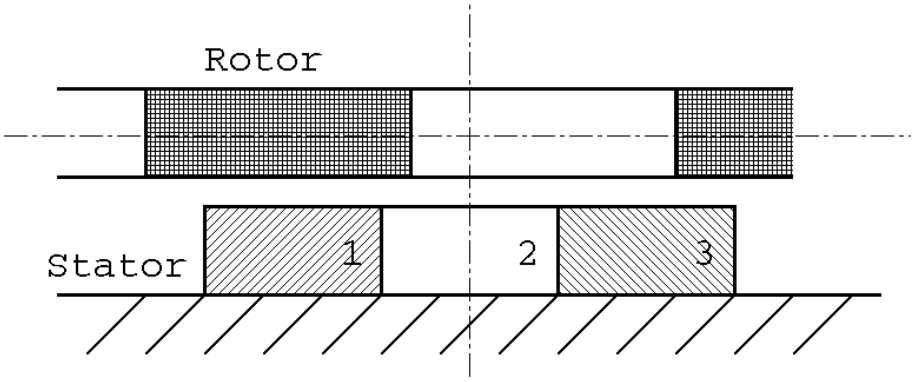
4.1.1.1 Pole rotoru a statoru

Rotor LM je tvořen za sebou naskládanými permanentními magnety o stejné délce L_0. Magnety tak vytváří v okolí rotoru magnetické pole. Průběh siločar zachycuje obrázek 4.1. Modře jsou na něm vyznačeny siločáry, červeně vektory magnetické indukce. Pro nás je zajímavá pouze kolmá složka magnetické indukce. Pouze ta má silové účinky ve směru pohybu. Účinky rovnoběžné složky se kompenzují, bez pohybových účinků v ložiskách rotoru a v ukotvení statoru. Následně budu užívat indukci ve významu kolmá složka vektoru indukce.

Magnetickou indukci podél rotoru budu aproximovat harmonickým průběhem. Jeho velikost je dána kvalitou permanentních magnetů. Pro různé polohy rotoru x měřené od středu statoru, bude velikost magnetické indukce vybuzované rotorem v



Obrázek 4.1: Magnetické pole rotoru LM.



Obrázek 4.2: Uspořádání LM.

místě geometrického středu statoru (viz. obrázek 4.2) dána kupř. tímto vyjádřením harmonické funkce[1]

$$B_{ROT} = -B_{RM} \cos(\varphi_x), \tag{4.1}$$

kde B_{RM} je amplituda indukce a φ_x "fáze pohybu" odvozená od polohy x. Fáze pohybu je dána následovně

$$\varphi_x = \frac{2\pi}{L_0} x + \varphi_{R0}. \tag{4.2}$$

L_0 je délka jednoho magnetu a φ_{R0} je fázový posuv, který bude určen až při identifikaci.

Stator je tvořen třífázový vynutím, uloženým pod rotorem. Situaci zachycuje obrázek 4.2. Cívky jsou pevně spojeny s podložkou, rotor se pohybuje nad nimy.

Trojici cívek napájíme z třífázového zdroje, ten je řízen hodnotami U_m a φ_U. Pro

[1] Výběr byl volen s ohledem na výsledky z průběhu indukce odvozené.

jednotlivá jeho napětí pak platí

$$\begin{aligned} u_1 &= U_m\, sin(\varphi_U) \\ u_2 &= U_m\, sin(\varphi_U + \frac{2}{3}\pi) \\ u_3 &= U_m\, sin(\varphi_U + \frac{4}{3}\pi). \end{aligned} \tag{4.3}$$

Protože jednotlívé cívky mají stejné elektrické parametry (odpor, indukčnost), tak proudy cívkami také tvoří třífázovou soustavu[2]. Magnetické pole statoru je potom harmonické.

4.1.1.2 Indukovaná napětí

Pohybem rotoru se mění magnetická indukce v cívkách statoru. Změna indukce indukuje napětí. Indukované napětí je záporná derivace magnetického toku

$$u_i = -\frac{d}{dt}\Phi, \tag{4.4}$$

tok je vyvozován polem rotoru

$$\Phi = B_{ROT}(\varphi_x)\, S, \tag{4.5}$$

kde S je plocha závitů civky kolmá k ose rotoru. Tato plocha je konstantní, napětí je tedy úměrné pouze změně indukce

$$u_i = -K_{UB}\, \frac{dB_{ROT}}{dt}, \tag{4.6}$$

kde K_{UB} je konstanta daná geometrickými rozměry cívky a počtu jejich závitů.

Indukce vybuzené rotorem v jednotlivých cívkách statoru jsou (viz rovnice 4.1 a obrázek 4.2) následující

$$\begin{aligned} B_1 &= -B_{RM}\, \cos(\varphi_x) \\ B_2 &= -B_{RM}\, \cos\left(\varphi_x + \frac{2}{3}\pi\right) \\ B_3 &= -B_{RM}\, \cos\left(\varphi_x + \frac{4}{3}\pi\right). \end{aligned} \tag{4.7}$$

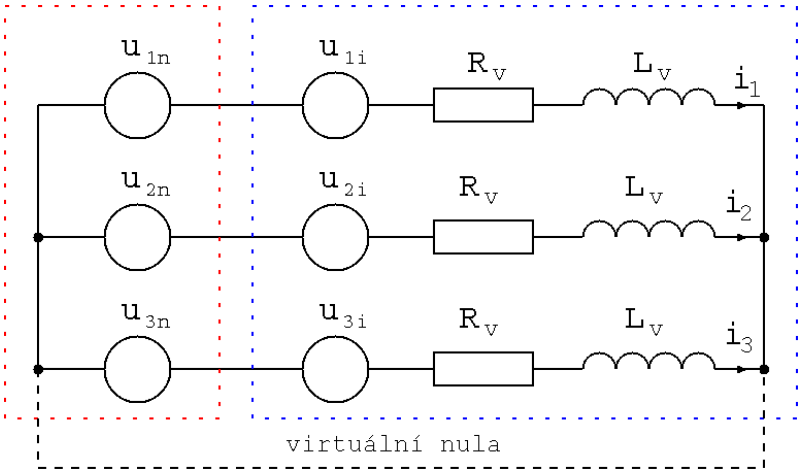
Rozepsáním pro jednotlivé složky dostávám

$$\begin{aligned} u_1 &= -K_{UB} \cdot \dot{\varphi}_x B_{RM}\, \sin(\varphi_x) \\ u_2 &= -K_{UB} \cdot \dot{\varphi}_x B_{RM}\, \sin\left(\varphi_x + \frac{2}{3}\pi\right) \\ u_3 &= -K_{UB} \cdot \dot{\varphi}_x B_{RM}\, \sin\left(\varphi_x + \frac{4}{3}\pi\right). \end{aligned} \tag{4.8}$$

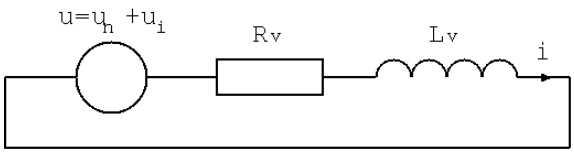
Derivaci fáze pohybu vyjádřím

$$\dot{\varphi}_x = \frac{d}{dt}\frac{2\pi}{L_0}x = \frac{2\pi}{L_0}\dot{x}, \tag{4.9}$$

[2]Proudy jsou vůči sobě posunuty o $\frac{2}{3}\pi$



Obrázek 4.3: Elektrické schéma motoru připojeného na třífázový zdroj napětí.



Obrázek 4.4: Elementární obvod.

kde $\dot{x}$ představuje rychlost pohybu rotoru v. Dostávám tak finální tvar rovnic pro indukované napětí.

$$\begin{aligned} u_1 &= -K_u\, v\, \sin\left(\varphi_x\right) \\ u_2 &= -K_u\, v\, \sin\left(\varphi_x + \frac{2}{3}\pi\right) \\ u_3 &= -K_u\, v\, \sin\left(\varphi_x + \frac{4}{3}\pi\right). \end{aligned} \tag{4.10}$$

Konstatnta K_u v sobě zahrnuje dříve užité konstanty a představuje závislost amplitudy indukovaného napětí na rychlosti motoru. Získaná trojice rovnic modeluje indukované napětí.

4.1.1.3 Proudy

Pro určení proudů v motoru je nutné znát jeho náhradní zapojení. To uvádí obrázek 4.3.

Červeně je na něm vyznačena část zdroje napětí u_n, modře vlastní motor. Motor se skládá ze zdroje napětí u_i (indukované napětí), indukčnosti L_v a odporu R_v. Vzájemná indukčnost není pro jednoduchost uvažována. Cívky motoru jsou zapojeny do hvězdy. Napájecí zdroj tvořený trojitým můstkem si lze také představit jako do hvězdy zapojené tři zdroje napětí. Díky symetriím všech větví, je pak rozdíl potenciálu ve středech obou hvězd nulový. Můžeme si tedy pro představu zavést vodič "virtuální nula". Díky němu se celý obvod zdroje a motoru rozpadne na tři stejné obvody (viz. obrázek 4.4). Každý z těchto obvodů je popsán touto obvodovou rovnicí

$$u = R_v\, i - L_v \frac{di}{dt}, \tag{4.11}$$

kde

$$u = u_n + u_i. \tag{4.12}$$

Úpravou obvovodé rovnice dostávám

$$\frac{di}{dt} = \frac{u - R_v\, i}{L_v}. \tag{4.13}$$

Tato rovnice je již modelem proudu v jedné cívce. Celkový model LM bude obsahovat tři modely proudu - pro každou fázi jeden.

Nyní když znám proudy mohu začít zkoumat jejich silové účinky.

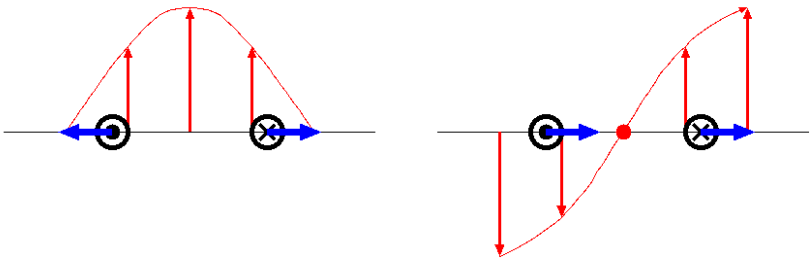
4.1.1.4 Silové účinky proudu

Silové účinky určím dle Flemingova pravidla určujícího sílu na vodič

$$F = B\, I\, l, \tag{4.14}$$

kde B je složka magnetické indukce kolmá na osu rotoru (viz. dále), I je proud vodičem a l je jeho délka.

Průběh magnetické indukce stále předpokládám harmonický. Cívka představuje pro silové účinky dva vodiče, jimiž protéká opačný proud. Situaci ukazuje obrázek 4.5.



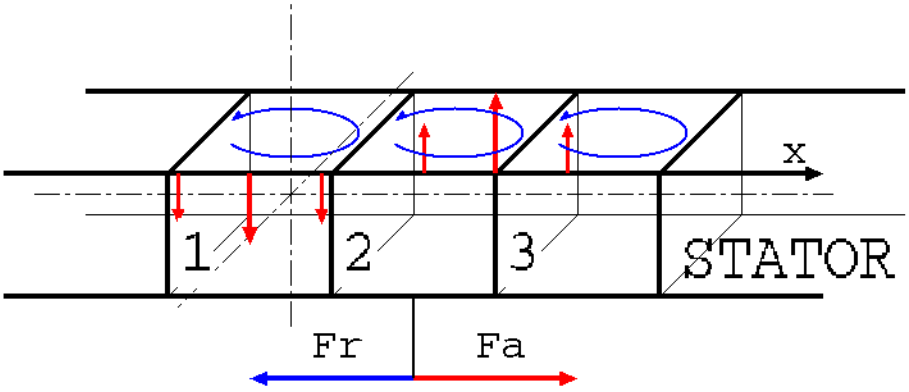
Obrázek 4.5: Vodiče cívky v magnetickém poli.

Červeně je na něm zachycena mag. indukce a modře síly působící na jednotlivé vodiče. Když je střed cívky v oblasti s maximální indukcí (obrázek 4.5 vlevo), tak je každý vodič cívky v poli se stejně orientovanou indukcí. Díky opačnému proudu ve vodičích cívky, jsou pak silové účinky na každý vodič opačné a výsledná síla je nulová[3]. Naopak pokud je indukce ve středu cívky nulová (obrázek 4.5 vpravo), pak je indukce v každém vodicí opačného směru, a díky opačným proudům působí síla na oba vodiče ve stejném směru, síla je v tu chvíli maximální.

Nyní už vím, kdy bude mít síla velkou hodnotu a kdy malou. Zajímá mě tedy ješte její znaménko, poté už budu schopen popsat sílu pomocí harmonické funkce[4]. Směr síly určí Lenzovo pravidlo levé ruky. Situaci zachycuje obrázek 4.6, jsou na něm zobrazeny cívky statoru v poli rotoru a vzájemné účinky polí. Červenými vektory je vyznačena indukce rotoru B_{ROT} do statoru, ta je dána rovnicí 4.1, modře je vyznačen

[3]Výsledná síla se kompenzuje v závitu.

[4]Magnetickou indukci jsem aproximoval harmonickou funkcí, potom i průběh síly na poloze bude harmonický.



Obrázek 4.6: Silové poměry v LM.

kladný směr proudu v cívkách. Střed souřadné soustavy je v místě průsečíku všech tří čerchovaných os. Z tohoto středu se měří také fáze pohybu φ_x.

Aplikací Lenzova zákona dostaneme sílu působící na stator, je to síla F_a. Této síle odpovídá reakce F_r, která působí na rotor. Pouze tato reakce má pohybový účinek[5].

Nyní už lze formulovat silové účinky proudu v závislosti na poloze rotoru, jednotlivé síly jsou

$$\begin{aligned} F_1 &= K_i\, I_1\, \sin\left(\varphi_x\right) \\ F_2 &= K_i\, I_2\, \sin\left(\varphi_x + \frac{2}{3}\pi\right) \\ F_3 &= K_i\, I_3\, \sin\left(\varphi_x + \frac{4}{3}\pi\right), \end{aligned} \tag{4.15}$$

kde I_1, I_2, I_3 jsou proudy jednotlivých fází a K_i je proudová konstanta LM. Elektrické

a silové účinky LM jsem popsal. V popisu jsem neuvažoval dynamiku. Tu vyřeším až současne s modelem LCE. Neboť fyzicky jde o jeden celek[6]. Nyní uz je LM popsám a vše je připraveno na vytvoření jeho simulačního modelu.

4.1.2 Simulační model

Stejně jako byl LM popsán v několika sekcích, kdy v každé byl popsán jeden problém. Bude i celkový model složen z několika podmodelů, které vždy řeší konkrétní problém.

4.1.2.1 Bloček LM

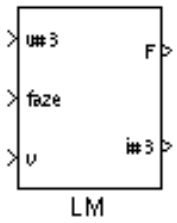
Celkový simulinkový bloček, modelující LM je ukázán na obrázku 4.7. Vstupen je trojice napětí jednotlivých fází[7], fáze a rychlost pohybu. Výstupen je síla kterou motor působí a trojice proudů jednotlivými cívkami vinutí.

Strukturu bločku, který modeluje LM zachycuje obrázek 4.8. Bloček se skládá ze tří podbločků. Jsou jimi *induk_napeti* představující indukované napětí, *imped1,*

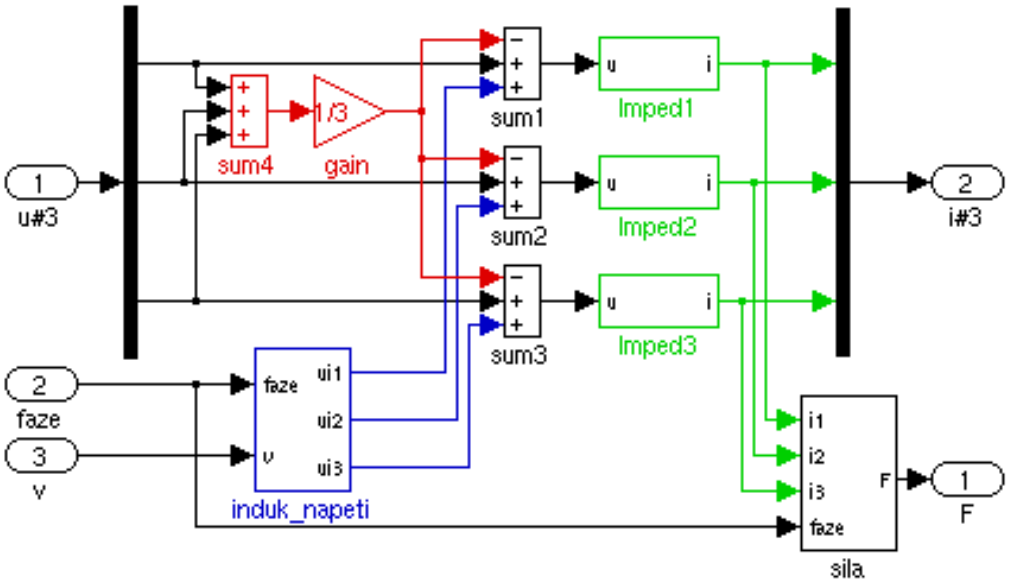
[5]Stator je pevně uchycen, tudíž síla F_a je kompenzována v uchycení

[6]Písty CE jsou pevně spojeny s rotorem.

[7]Vstup nebo výstup, který je vektorem (obsahuje více signálů) značím $u\#n$, kde u je typ je zkratka názvu signálu a n je počet signálů.



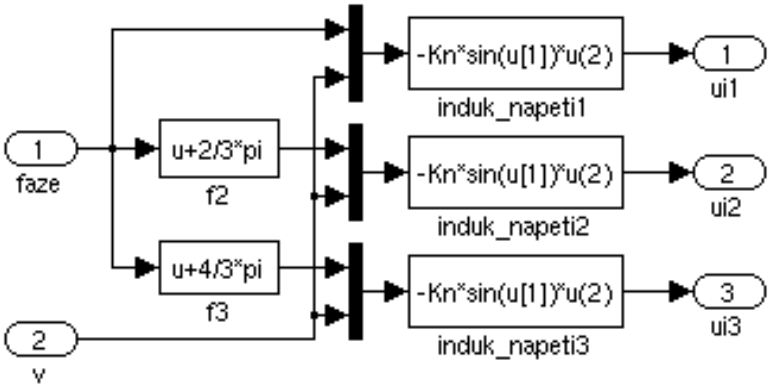
Obrázek 4.7: Bloček modelující LM.



Obrázek 4.8: Struktura bločku modelujícího LM.

imped2, imped3 reprezentující reaktance jednotlivých cívek, *sila* reprezentující silové účinky proudu. Jejich struktura bude popsána dále. Kromě zmíněných podbločků, se bloček LM skládá z červeně označených prvků *sum* a *gain*. Ty počítají stejnosměrnou složku třífázového napětí[8]. Prvky *sum1*, *sum2* a *sum3* provádějí sčítání indukovaného, napájecího napětí a odečítají stejnosměrnou složku. Takto vytvořený model se opírá o skutečnosti odvozené v předchozí podsekci 4.1.1.

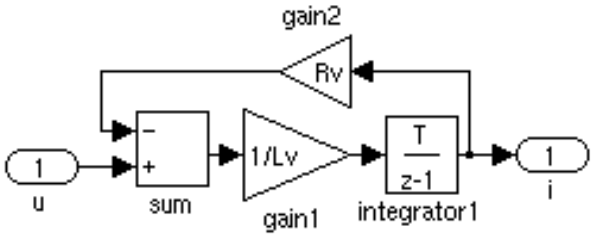
4.1.2.2 Bloček indukované napětí



Obrázek 4.9: Struktura bločku modelujícího indukované napětí.

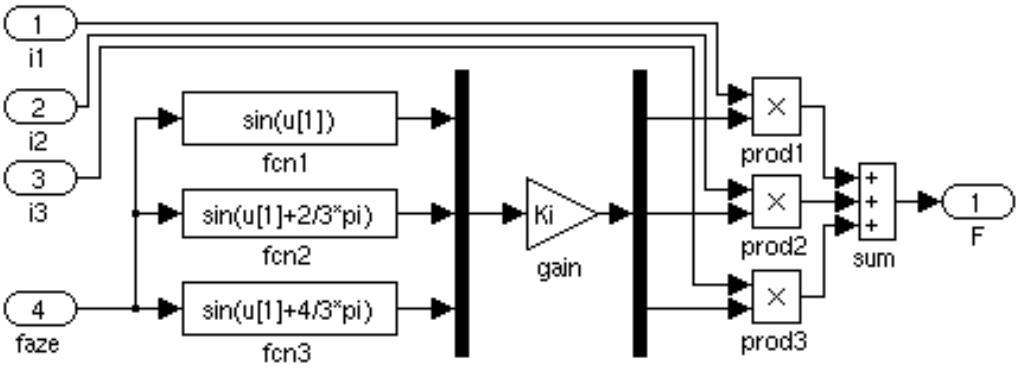
Vstupen do bločku indukované napětí je fáze pohybu a rychlost. Výstupem je trojice indukovaných napětí jednotlivých fází. Celé schéma je postaveno na skutečnostech odvozených v předchozí podsekci 4.1.1, části Indukovaná napětí a implementuje rovnici 4.10. Prvky *f1* a *f2* zpožďují fázi 2 a 3. Funkce *induk_napeti1*, *induk_napeti2* a *induk_napeti3* generují jednotlivá napětí na základě rychlosti, napěťové konstanty a fáze.

4.1.2.3 Bloček impedance



Obrázek 4.10: Struktura bločku modelujícího impedanci cívky statoru.

Bloček reprezentuje impedanci cívky. Vstupen je napětí, výstupem proud. Strukturu zachycuje obrázek 4.10. Simulační zapojení vyšlo z fakt z podsekce 4.1.1, části Proudy a implementuje rovnice 4.13 a 4.12.



Obrázek 4.11: Struktura bločku modelujícího silové účinky proudu.

4.1.2.4 Bloček silový účinek proudu

Bloček modeluje proměnný silový účinnek proudu v závislosti na fázi pohybu rotoru. Jeho schéma zachycuje obrázek 4.11. Vstupuje do něj fáze a trojice proudů. Výstupem je síla. Prvky *fcn1*, *fcn2* a *fcn3* generují "váhu" pro každou cívku - velikost indukce. Tato "váha" ja následně přenásobena prvkem *gain*. Prvek reprezentuje silovou proudovou konstantu. Na závěr se přenásobí jednotlivé proudy příslušnou váhou v prvcích *prod1*, *prod2* a *prod3*. Výsledkem je síla pro každou z cívek. Součtem sil dostaneme celkovou sílu. Součet realizuje prvek *sum*. Model je realizován na základě faktů z předchozí sekce 4.1.1, části Silové účinky proudu a implementuje rovnici 4.15.

V této části jsem vytvořil elektromechanický model LM. Popsal jsme jakou silou působí, a jaké proudy jím tečou v závislosti na budícím napětí, fázi a rychlosti. Do modelu jsem nezapočítal vliv hmoty rotoru, tu započítám později do celkové dynamiky systému.

4.1.3 Identifikace

Doposud jsem všechny vztahy odvodil na základě konstant, jejichž velikostí jsem se nezabýval. Nyní tyto velikosti určím.

Všechny konstanty jsem vyčetl z dokumentace dodávané výrobcem LM. Hodnoty všech konstant týkájících se modelu LM zachycuje tabulka 4.1.3.

$L_0 = 0.05\,m$	délka jednotlivých magnetů rotoru
$R_v = 11,8\,\Omega$	odpor vinutí jedné cívky
$L_v = 32\,mH$	indukčnost jedné cívky
$K_u = 54.6\,Vm^{-1}s$	rychlostní napěťová konstanta ($U_i = K_u\,v$)
$K_i = 100\,NA^{-1}$	silová proudová konstanta ($F = K_i\,I$)

Tabulka 4.1: Tabulka velikosti jednotlivých konstant modelu LM.

[8]Tyto prvky předcházejí chybám v simulaci při napájení s nenulovou střední hodnotou

4.2 Termodynamický model CE

Termodynamický děj ve spalovacím motoru je modelován s předpoklady, že pracovní látka (zápalná směs) se chová jako ideální plyn a že probíhající děje jsou vratné. V modelu vycházím z [6] z čehož přejímám termodynamický popis. Model dále rozšiřuji o průběh vývinu tepla při hoření, čerpám při tom z [8].

4.2.1 Termodynamický popis

Termodynamické děje popíšu ve dvou částech. V první popíšu hoření pracovní směsi a ve druhé vlastní termodynamické děje.

4.2.1.1 Vývin tepla

Než se pustím do celkového popisu činnosti motoru, tak vysvětlím model vývinu tepla. Tento model popisuje hoření pracovní směsi v časové závislosti a tím tedy udává vývoj tepla. Funkce vývinu tepla je reprezentována tzv. Wiebeho funkcí (viz [8]). Ve zmíněném zdroji je pojednáno o jejím použití pro klasické rotační spalovací motory. Tedy motory s ojnicí pístu napojenou na klikovou hřídel. U takovéhoto motoru se poloha udává úhlem natočení klikové hřídele, resp. počítá se z tohoto úhlu. Proto i Wiebeho funkce je uvažovaná jako funkce závislá na úhlu natočení θ, a je uvažována při konkrétních otáčkách motoru. Faktor wiebeho funkce vypadá takto

$$f(\theta) = 1 - \exp\left(-a\left(\frac{\theta - \theta_0}{\triangle\theta}\right)^n\right), \tag{4.16}$$

kde a a n jsou parametry, θ_0 úhel zážehu, $\triangle\theta$ je úhlová délka intervalu hoření ($\triangle\theta = \theta_{konec} - \theta_{start}$) a θ je aktualní úhel natočení. Faktor zadává tvar, průběh. Jeho hodnoty jsou v intervalu $< 0,1 >$. Skutečné hodnoty průběhu výdeje tepla jsou pak zvětšeny celkovým teplem Q_{in}, které se při hoření uvolní. Tedy

$$Q(\theta) = f(\theta)\, Q_{in} \tag{4.17}$$

a

$$\frac{dQ}{d\theta} = Q_{in}\frac{(1-f)\, n\, a}{\triangle\theta}\left(\frac{\theta - \theta_0}{\triangle\theta}\right)^{n-1}. \tag{4.18}$$

Takto tedy vypadá průběh hoření u rotačního spalovacího motoru. Náš motor je lineární a tedy úhel natočení klikové hřídele určit nelze, protože klikovou hřídel motor neobsahuje. Když ale uvážím, že Wiebeho funkce zachycuje průběh hoření v čase a rotační motor má díky svému setrvačníku během celého cyklu téměř stejnou úhlovou rychlost, pak

$$\theta = \omega\, t.$$

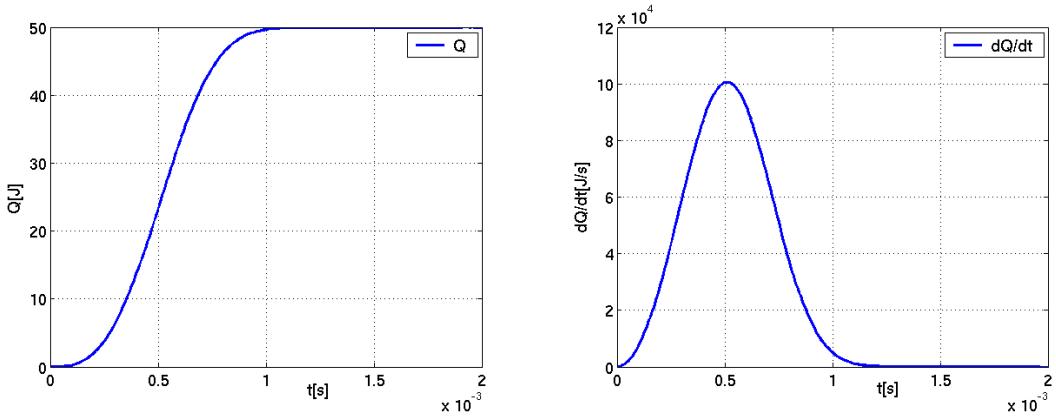
Dosazením tohoto do rovnice faktoru Wiebeho funkce 4.16 se ω vykrátí a dostávám faktor jako funkci času

$$f(t) = 1 - \exp\left(-a\left(\frac{t - t_0}{\triangle t}\right)^n\right), \tag{4.19}$$

kde t_0 je začátek hoření, $\triangle\, t$ je doba hoření a t je aktuální čas.

Rovnice vývoje tepla 4.17 tak přechází na tvar

$$Q(t) = f(t)\, Q_{in}. \tag{4.20}$$



Obrázek 4.12: Průběh wiebeho funkce hoření a její derivace.

Rovnice přírůstku tepla se také mění

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dQ}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt}$$

dosazením z rovnice 4.18 a postupnými úpravami

$$= \frac{(1 - f(t))\, n\, a}{\triangle \omega\, t} \left(\frac{\omega\, t - \omega\, t_0}{\triangle(\omega\, t)} \right)^{n-1} \cdot \omega \cdot Q_{in}$$

$$= \frac{(1 - f(t))\, n\, a}{\omega \triangle t} \left(\frac{t - t_0}{\triangle t} \right)^{n-1} \cdot \omega \cdot Q_{in}$$

a tak dostávám

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{(1 - f(t))\, n\, a}{\triangle t} \left(\frac{t - t_0}{\triangle t} \right)^{n-1} \cdot Q_{in}. \tag{4.21}$$

Rovnice 4.20 a 4.21 udávají průběh vývinu tepla v čase. Obě popisují tentýž jev a integrací, popř. derivací jdou na sebe převést. Uvedl jsem je obě, neboť záleží na konkrétním případě užití, která z nich se více hodí.

Závěrem ještě jednou připomenu, že první rovnice říká jaké teplo se již uvolnilo a druhá říká jak rychle se v danou chvíli teplo uvolňuje.

Beru hodnoty konstant $a = 5$ a $n = 3$[9]. Zbývají tři parametry - doba hoření $\triangle t$, doba zápalu t_0 a celkové teplo Q_{in}. Doba zápalu nemá vliv na tvar, dobou hoření a celkovým teplem se budu zabývat v části Identifikace. Pro názornost přikládám graf průběhů funkcí vývoje tepla na obrázku 4.12. Ten byl vygenerován pro $t_0 = 0$, $\triangle t = 1\, ms$, $Q_{in} = 50J$.

4.2.1.2 Termodynamický proces

Tento model je založen na zjednodušeném popisu termodynamických dějů. Je jistou idealizací, při níž budeme předpokládat, že plyn je ideální a probíhající děje jsou vratné. Vratným dějem rozumíme jeho idealizaci, pro kterou se předpokládá průchod děje pouze rovnovážnými stavy. To umožňuje aplikaci stavové rovnice plynů vkaždém okamžiku děje. Zároveň přepokládám neměnnost poměru $C_p/C_V = 1,4$, který se ovšem u reálných pracovních oběhů liší pro kompresi a expanzi zdůvodu jiného

[9] Více o nich v sekci Identifikace.

složení a jiné teploty náplně válce. Kodvození modelu použiju stavovou rovnici plynů a první termodynamickou větu.

Vstupy modelu termodynamického procesu jsou časový přírůstek spalováním dodávaného tepla $\delta Q_H/dt$, poloha $x(t)$, rychlost v a plnící tlak $p_{in}(t)$.

Výstupem z modelu je síla kterou působí směs ve válci na píst $F(t)$.

Stavová rovnice plynu popisující vztah mezi tlakem p, objemem V, teplotou T je

$$p\,V = n\,R\,T,$$

kde n je počet molů a R je molární plynová konstanta.

První termodynamická věta popisující vztah mezi plynu dodaným teplem Q, jeho vnitřní energií U a jím vykonanou prací W

$$\delta Q = dU + \delta W.$$

Pro vratné děje platí

$$\delta W = p\,dV$$

Rozeznáváme čtyři základní termodynamické děje a to: děj izotermický - děj při jehož průběhu má plyn konstantní teplotu, izobarický - děj při jehož průběhu má plyn konstantní tlak, děj izochorický - při jehož průběhu má plyn konstantní objem a adiabatický - děj při jehož průběhu nedochází k výměně tepla s okolím. Stlačování plynu ve válci spalovacího motoru sice není ani jedním z těchto idealizovaných dějů, ale vzhledem k jeho rychlosti na něj lze vhrubých rysech uplatnit příměr k adiabatickému ději. Idealizace spočívá v předpokladu, že děj probíhá natolik rychle, že energii během něj vyměněnou s okolím lze zanedbat. Pro adiabatický děj tedy platí první termodynamická věta ve tvaru

$$\delta Q = 0 = dU + \delta W. \tag{4.22}$$

Znamená to, že plyn koná práci na úkor vnitřní energie. Pro náš případ tedy budeme kompresi směsi ve válci uvažovat jako děj adiabatický. Pro odvození modelu je dále třeba vyjádřit stavovou rovnicí plynů v diferenciálním tvaru

$$p\,dV + V\,dp = n\,T\,dT, \tag{4.23}$$

a přírůstek vnitřní energie dU jako

$$dU = n\,C_V\,dT. \tag{4.24}$$

Nyní dosadíme 4.24 do první termodynamické věty 4.22 a z 4.23 vyjádříme diferenciál teploty dT a dosadíme. Úpravou získáme vztah

$$\delta Q = 0 = \frac{C_v}{R}\,(p\,dV + V\,dp) + p\,dV. \tag{4.25}$$

Doposud jsme vrámci zjednodušení předpokládali, že děj komprese i následné expanze probíhá adiabaticky. Ve spalovacím motoru se však během cyklu přivádí energie získaná spalováním směsi uhlovodíkového paliva se vzduchem. Proto levá strana vztahu 4.25 nebude nulová, ale bude rovna diferenciálu tepla δQ_H dodaného spalováním. Všechny způsoby výměny tepla sokolím budu i nadále považovat za zanedbatelné

$$\delta Q_H = \frac{C_V}{R}\,(p\,dV + V\,dp) + p\,dV.$$

Po jednoduchých úpravách a za použití Mayerova vztahu

$$C_p = C_V + R$$

vyjádříme přírůstek tlaku dp

$$dp = \frac{1}{C_V\,V}\left(R\,\delta Q_H - C_p\,p\,dV\right).$$

Nyní vynásobením celé rovnice a vyjádřím časový přírůstek tlaku vzávislosti na časovém přírůstku dodávaného tepla a objemu

$$\frac{dp}{dt} = \frac{1}{C_V\,V}\left(R\,\frac{\delta Q_H}{\delta t} - C_p\,p\,\frac{dV}{dt}\right). \tag{4.26}$$

Simulace takto vyjádřené rovnice je již snadno realizovatelná a díky ní získáme tlak. Z tlaku pak snadno dostaneme sílu dle

$$F = S\,p. \tag{4.27}$$

Rovnice 4.26 popisuje cyklus vtrvale uzavřeném prostoru válce bez podchycení skutečnosti, že dochází kvýměně náplně válce. Proto nutno model dále upravit.

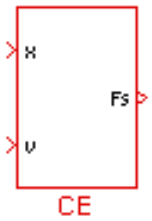
Vnašem případě se jedná o dvoudobý motor, u něhož k dochází naplňování válce souběžně svýfukem. Naplňování končí okamžikem kdy píst pohybující se směrem k horní úvrati uzavře přepouštěcí kanály, krátce po té se uzavírají i výfukové kanály. Tehdy je ve válci tlak, který je zde nazýván plnící a označen p_{in}.

Po uzavření přepouštěcích i výfukových kanálů dochází ke kompresi, vytvoření směsi pomocí vstřiku paliva, jejímu zapálení, vývinu tepla a následné expanzi. Expanze a její silové účinky na píst končí otevřením výfukových kanálů. Pro zjednodušení budeme uvažovat, že kotevírání výfukových i přepouštěcích kanálů dochází současně, poloha ve které se tak děje je označena x_k. Dále, že ihned po jejich otevření nabývá tlak ve válci hodnoty p_{in}.

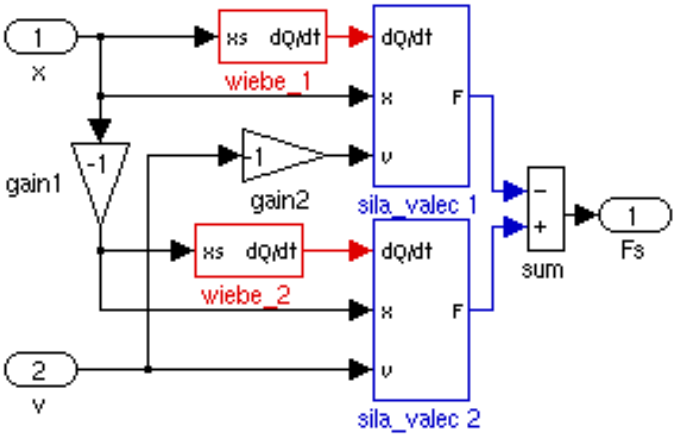
Síly působící na píst vlivem dynamiky proudících plynů zanedbávám. Tuto výměnu budu realizovat nastavením integrátorů stavových veličin v příslušnou chvíli na danou hodnotu. Toto nastavení popíšu v následující podsekci Simulační model.

4.2.2 Simulační model

Celkový simulační bloček termodynamiky CE zachycuje obrázek 4.13. Vstupen je poloha a rychlost. Činnost modelu je odvozena od polohy - v určitém okamžiku dojde k zápalu, v určitém k výměně pracovní směsi. Z rychlosti se počítá rychlost změny objemu. Výstupem bločku je síla kterou působí pracovní směs na píst. Schéma bločku modelu spalování ukazuje obrázek 4.14. Hlavními podbločky jsou dvojice *wiebe* a dvojice *sila_valec*. Podbločky *wiebe_1* a *wiebe_2* generují průběh vývinu tepla. Podbločky *sila_valec 1* a *sila_valec 2* modelují termodynamické procesy. Prvky *gain* a *gain2* mění směr rychlosti resp. znaménko polohy. Je to proto, že když se objem v jednom válci zmenšuje, tak se díky geometrickému uspořádání motoru objem v druhém válci zvětšuje. Stejně tak i síly se v prvku *sum* sčítají s opačnými znaménky. Síly jednotlivých pístů působí opačnými směry. Nyní se budu zabývat jednotlivými podbločky.



Obrázek 4.13: Simulační model spalování.

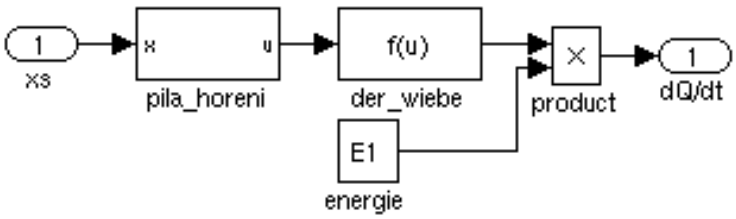


Obrázek 4.14: Schéma modelu spalování.

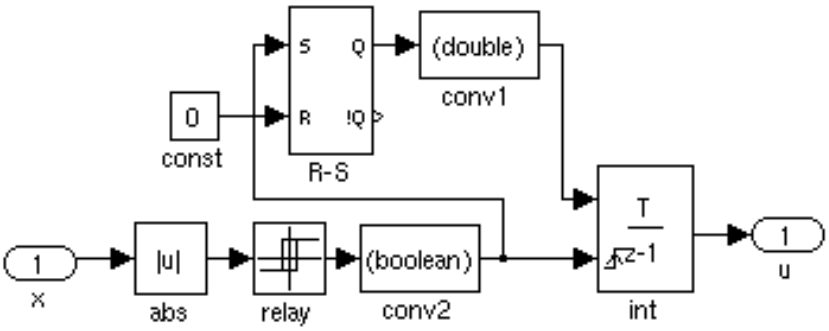
4.2.2.1 Vývin tepla

Strukturu bločku vývinu tepla zachycuje obrázek 4.15. Základním kamenem bločku je podbloček *pila_horeni*. Tento podbloček generuje pilový signál, který je vždy nastaven na nulu při průchodu místem zápalu. Prvek *der_wiebe* implementuje derivaci wiebeho funkce pro vstupní hodnotu času. Násobící prvek *product* a konstanta *energie* zajišťují zvětšení amplitudy vývinu tepla na požadovanou hodnotu a určuje tak celkové při hoření uvolněné teplo.

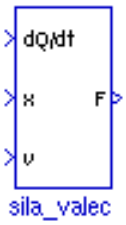
Bloček generující pilu času pro bloček Wiebeho funkce je zobrazen na obrázku 4.16. Jeho základem je integrátor *int*, ten od okamžitu prvního překročení prahu zápalu integruje hodnotu jedna. Bere ji přes prvek konverze z typu `boolean` na typ `double` z klopného obvodu *R-S*. Klopný obvod hodnotu jedna drží od okamžiku jejího dosažení napořád, neboť díky trvale nulové úrovni na jeho R vstupu ho nelze vynulovat. Smysl tohoto je aby model negeneroval rostoucí pilu hned od okamžiku



Obrázek 4.15: Schéma modelu vývinu tepla.



Obrázek 4.16: Schéma modelu pily pro model vývinu tepla.



Obrázek 4.17: Model termodynamické síly hoření.

spuštění, ale až ve chvíli průchodu místem zápalu. Vstupní signál jde přes prvek bsolutní hodnota *abs* do prvku *relay*. Ten má rozhodovací úroveň nastavenou na polohu zápalu x_z. Před ní má na svém výstupu nulu, za ní jedničku. Generuje tak obdélník s náběžnou hranou při průchodu místem zápalu. Touto náběžnou hranou dojde k resetu integrátoru *int* na nulu a tak se na výstupu integrátoru objevuje pila času pro Wiebeho funkci.

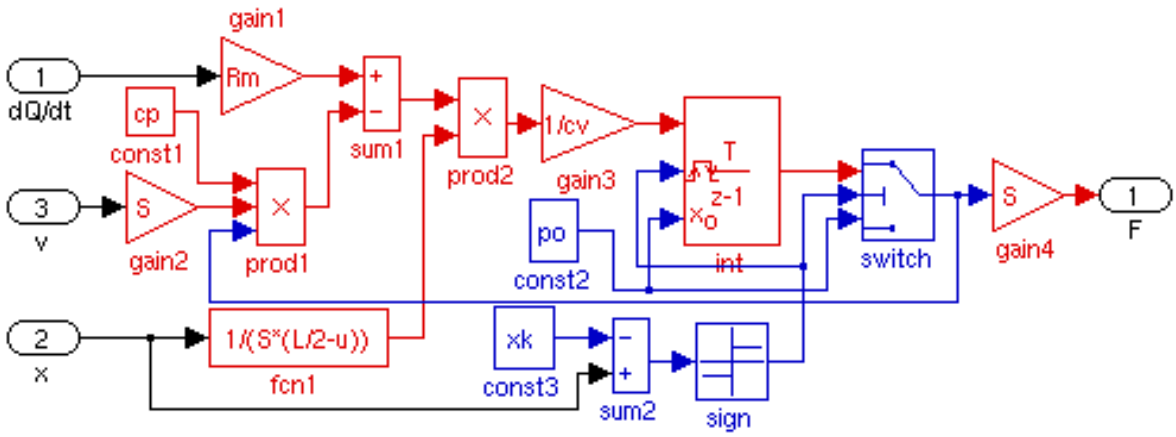
4.2.2.2 Termodynamický proces

Nyní popíšu model vzniku termodynamické síly. Bloček je na obrázku 4.17. Vstupen do bločku je rychlost vývinu tepla dQ/dt, rychlost v a poloha x. Výstupem je síla vznikající hořením směsi.

Schéma bločku je na obrázku 4.18. Toto schéma vychází z fakt odvozených v předchozí podsekci Termodynamický popis, implementuje rovnice 4.26 a 4.27 a modeluje výměnu pracovní směsi ve válci. Červené prvky implementují rovnici síly, modré prvky modelují výměnu pracovní směsi. Nejprve vysvětlím činnost červené části. Do vstupu integrátoru *int* vstupuje dp/dt a na jeho výstupu tedy je tlak p. Ten se násobí plochou v prvku *gain4* a dostávám tak sílu. Význam zbylých červených členů přesně koresponduje s implementovanou rovnicí 4.26 a při pohledu na ni je snadno čitelný. Stačí si pouze uvědomit, že na výstupu *gain2* je dV/dt protože $v = dx/dt$ a $dV = S\,dx$ a že na výstupu *fcn1* je $1/V$. Pro objem totiž platí $V = S\,(L/2 - x)$, kde L je celkový zdvih. Člen $L/2$ tam je protože poloha x je měřena od prostředku motoru na obě strany. Tedy pro $x = 0$ je objem poloviční. Zbývá dovysvětlit činnost modrých prvků.

Na výstupu prvku *sgn* je hodnota 1 pro $x > x_k$[10] a jinak hodnota -1. Jde tedy o

[10]Pro představu uvedu, že x_k je v našem případě $x_k = -3mm$. Pro hodnoty menší než x_k dochází k výměně pracovní směsi, pro hodnoty větší ke kompresi a hoření.



Obrázek 4.18: Schéma modelu termodynamické síly.

obdélníkový signál odvozený od pozice. Tento signál řídí přepínač *switch* a integrátor *int*. Přepínač má prahovou hodnotu nula a tedy pro hodnotu -1 (resp. 1) vede signál prvního (resp. třetího) vstupu. Integrátor reaguje na hranu řídícího signálu a tedy každým průhodem polohou x_s dojde k jeho nastavení na tlak sání p_0. Pro polohu kdy $x > x_k$ (fáze stlačování, hoření) se tak na výstup celého bločku dostává signál z integrátoru, pro $x < x_k$ (fáze výměny směsi) se na výstup dostává signál z *const2* tedy tlak sání p_0.

4.2.3 Identifikace

Nyní odvozené vztahy zkonktretizuji určením hodnot konstant.

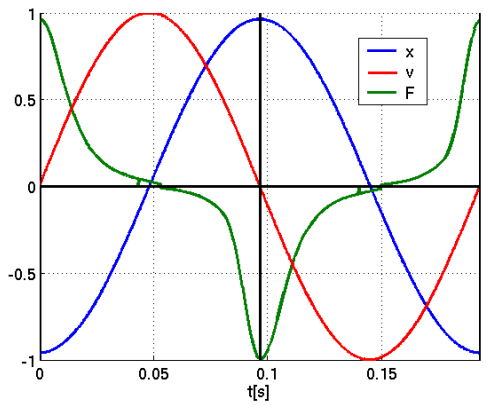
Jak již víme, hoření je popsáno Wiebeho funkcí. Její parametry jsou a, n, dále doba hoření T_H a celkové uvolněné teplo Q_{in}. Konstanty a a n se (dle [8]) obvykle volí $a = 5$ a $n = 3$. Tyto konstanty lze určit přesně z měření a porovnání p-V diagramů při zápalu a výpadku zápalu. Jejich určení je ale nad rámec této práce. Tyto hodnoty použiju.

Dobu hoření lze určit na základě znalosti funkce vysokootáčkových motorů, u nichž je pracovní délka zdvihu přibližne 50 % celkového zdvihu a pracují až při 14 000 ot/min. I za těchto podmínek všechno palivo vyhoří. Při daných otáčkách vychází délka periody 4 ms. Hoření probíbá v jedné čtvrtině a proto tedy $T_H = 1\,ms$. Tuto hodnotu budu používat[11]. Hodnota Q_{in} se mění v závislosti na nastaveném množství vstřikovaného paliva a na množství vzduchu (dáno nastavením sací klapky). Její typickou hodnotu jsem přibližně odhadl $Q_{in} = 50\,J$.

V modelu vystupovali geometrické rozměry částí LCE. Pro rozsah pohybu CE jsem naměřil hodnotu $L = 40\,mm$[12]. Změřil jsem průměr válce a vypočítal jeho plochu $S = 1,2 \cdot 10^{-4} m^2$. Místo kde dochází uzavření přepouštěcích kanálů je $x_k = -3\,mm$. Poloha zápalu je konstanta, která byla během pokusů měněna. Má velký vliv na výkon motoru. Její typická hodnota byla $x_z = 15\,mm$. Další konstantou je plnící tlak, ten volím roven atmosférickému $p_0 = 100\,kPa$.

[11] Doba hoření je mnohem menší než doba periody našeho motoru provozovaného přibližne na 1200 ot/min. a proto její přesnost nemá dramatický vliv celkové na chování.

[12] Jedná se o rozdíl vzdáleností kdy je píst opřen o hlavu - nulový objem. Pomocí dorazů je motor omezen na zdvih 38 mm



Obrázek 4.19: Simulační průběh při buzení CE.

Molární teplo ideálního plynu při konstantním objemu C_V a tlaku C_p stejně jako molární plynovou konstantu R_m jsem nalezl v tabulkách.

Přehledně jsou všechny konstanty týkající se termodynamického modelu zapsány v tabulce 4.2.

$a = 5$	parametr Wiebeho funkce
$n = 3$	parametr Wiebeho funkce
$C_V = 20.7\,kJ\,kg\,K^{-1}$	molární teplo při konstantním objemu
$C_p = 29.0\,kJ\,kg\,K^{-1}$	molární teplo při konstantním tlaku
$R_m = 8.3\,kJ\,kg\,K^{-1}$	molární plynová konstanta
$T_H = 1\,ms$	doba hoření
$Q_{in} = 50\,J$	teplo uvolněné při hoření[13]
$L = 40\,mm$	rozsah pohybu CE
$S = 1.2 \cdot 10^{-4} m^2$	plocha pístu
$x_k = -3\,mm$	místo uzavření přepouštěcích kanálů
$x_z = 15\,mm$	místo zápalu [14]
$p_0 = 100\,kPa$	plnící tlak

Tabulka 4.2: Tabulka hodnot parametrů modelu termodynamiky.

4.2.3.1 Simulační průběh

Pro ověření správné činnosti CE jsem provedl simulační test. Použil jsem generátor sinu, který generoval rychlost s amplitudou $2,5\,ms^{-1}$ s úhlovou frekvencí $130\,rad\,s^{-1}$. Polohu generoval integrátor připojený na generátor rychlosti. Amplituda dráhy byla $20\,mm$. Naměřená amplituda síly byla $5\,kN$. Jednotlivé průběhy zachycuje obrázek 4.19. Všechny průběhy jsou normovány na jednotkovou amplitudu. Smyslem je pouze zachytit jejich tvary. Modře je vyznačena poloha, červeně rychlost a zeleně síla. Poloha a rychlost jsou vybuzovány, nejsou proto tolik zajímavé jako síla. Obrázek zachycuje jeden celý cykl motoru, kdy v obou válcích dojde jak k hoření, tak k výměně směsi. Cykl začíná z dolní úvrati, roste rychlost, síla je kladná, roste poloha, pracovní směs koná práci. Motor projíždí nulovou polohou, za ní klesá rychlost, síla mění znaménko a dochází ke stlačování směsi v druhém válci a postupnému dosažení

horní úvratě v čase $0,1s$. Po ní začne konat práci směs druhého válce atd. jako u prvního válce.

Za povšimnutí stojí, že v první půli cyklu by integrál síly vyšel kladný a v druhé půli záporný. Skutečnost že není nula ukazuje, že motor koná práci. Dále za povšimnutí stojí kdy jde o sílu brzdnou a kdy o pohánějící. To se pozná podle toho jestli má shodné znaménko s rychlostí. Pokud ano, tak motor pohání.

Naznačený výsledek jednoduché simulace naznačuje správné chování modelu CE (resp. nenaznačuje nic co bych považoval za nesprávné).

4.3 Dynamika LCE

Model dynamiky popisuje pohybové účinky sil LM a CE. Tyto síly působí na pohyblivou část LCE a tak ovlivňují její rychlost a polohu.

4.3.1 Mechanický popis

Pohyblivá část LCE se kládá z pohyblivé části LM, to je tedy rotor LM, pohyblivé části CE, což jsou písty s ojnicí a vlastní klecí motoru, která tyto pohyblivé části drží při sobě. Klec se pohybuje na lineárních ložiskách, píst se tře pístními kroužky o stěnu pístu. Vzniká tak třecí síla, která je konstantní, označím ji F_t, má záporné znaménko, protože působí proti pohybu.

Sílu, kterou působí LM označím F_e (index dle síla elektrická) a sílu, kterou působí CE označím F_s (index dle síla spalování). Pro výsledné zrychlení platí.

$$\ddot{x} = \frac{F}{m},$$

kde F je součet sil působících na tělěso a tedy

$$F = F_e + F_s + F_t.$$

Dosazením do rovnice pro zrychlení $\ddot{x}$

$$\ddot{x} = \frac{1}{m}\left(F_e + F_m + F_t\right). \tag{4.28}$$

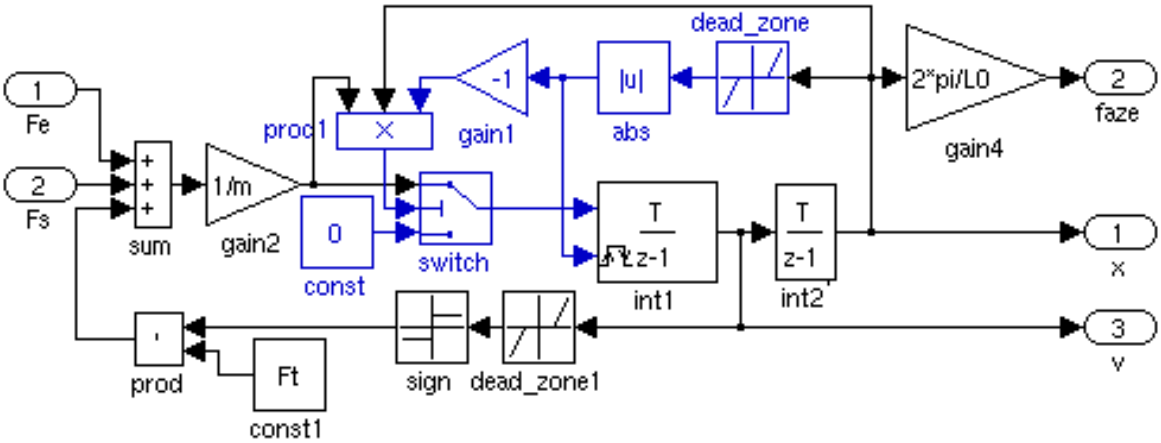
Tím je dynamika namodelována. Zatím jsem ale nerespektoval omezení dráhy. Toto omezení je realizované gumovým dorazem. Cílem řízení sice je udržet motor v jeho geometrických mezích, ale pokud se to nepovede, tak je dobré, aby i tato skutečnost byla simulačně podchycena. Doraz budu modelovat jako nepružný, tedy takový, kdy se vešterá kinetická energie přemění na teplo. Pohyb se tím zastaví. Teď už můžu přistoupit k popisu modelu.

4.3.2 Simulační model

Simulační model dynamiky implementuje rovnici 4.28 a zároveň modeluje doraz diskutovaný v předchozí podsekci. Celkový simulační model ukazuje obrázek 4.20. Vstupem do systému jsou síla LM F_e a síla CE F_s. Výstupem je rychlost v a poloha x.

Schéma modelu dynamiky zachycuje obrázek 4.21. Modře jsou označeny prvky modelující doraz, černě prvky implementující rovnici dynamiky. Doraz funguje tak,

Obrázek 4.20: Bloček modelující dynamiku LCE.

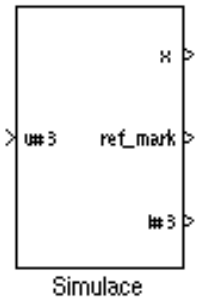


Obrázek 4.21: Schéma modelu dynamiky LCE.

že pokud poloha překročí mez rozsahu LM, dojde k resetu integrátoru rychlosti *int1* na nulu a na jeho vstup je následně puštěna pouze síla, která ho vrácí zpět do dovoleného rozsahu - tedy síla, která má opačné znaménko oproti znaménku pozice. Proto je na vstup přepínače *switch* přiveden součin síly, rychlosti a navíc signálu překročení meze polohy. Přepínač je nastaven, že pokud je signál druhého vstupu větší nebo roven nule, pouští první vstup, jinak třetí. Zesílení *gain1* mění znaménko řídícího signálu, tak aby se celkové chování spolu s prvkem *switch* odpovídalo popisu funkce omezení polohy. Černé prvky modelují rovnici dynamiky. Prvek *const1* definuje velikost odporové síly. Její znaménko je určeno dle směru pohybu funkcí signum na prvku *sign*. Předřazený prvek *dead_zone1* zajištuje nulovost odporové síly při rychlosti blízké nule. Na prvku *sum* se sčítají všechny síly a výsledek se po přenásobení převrácenou částí hmotnosti v *gain4* přivádí na integrátor *int1*. Na jeho výstupu je rychlost a ta vstupuje do integrátoru *int2*. Ten už má na výstupu polohu. s

4.3.3 Identifikace

Model dynamiky obsahuje pouze dvě proměnné. Jsou jimy hmotnost m a třecí síla F_t. Pohyblivá část se skládá z konstrukce s uchyceným rotorem, jejíž hmotnost je $m_1 = 3.97\,kg$. Dále je tato hmotnost dála ojnicemi a písty. Dohromady je tak hmotnost pohyblivé části $m = 4.5\,kg$. Sílu F_t jsem určil při buzení motoru harmonickým průběhem s konstantní amplitudou, srovnáním výkonového odběru. Více o tomto měření v 4.6.



Obrázek 4.22: Celkový model LCE.

4.4 Model řízeného třífázového můstku

Při odvození tohoto modelu navážu na kapilolu 3, kde jsem se zabýval jeho činností.

Řízený třífázový můstek propojuje LM se stejnosměrným zdrojem napětí U_{ss}. Pro každou fázi má jeden tranzistorový můstek, tvořený čtyřmi IGBT tranzistory. Ke své činnosti používá PWM modulaci a díky ní je schopen gererovat v každé fázi napětí U v rozsahu $< -U_{ss}, U_{ss} >$. Tomu odpovídá řídící signál r v rozsahu intervalu $< 0, 1 >$. Pokud tedy chci napětí U musím nastavit řídící signál na hodnotu r dle následujícího vztahu

$$r = \frac{1}{2}\left(1 + \frac{U}{U_{ss}}\right). \tag{4.29}$$

Můstek nemá svůj simulační model, a je realizován pouze implementací rovnice 4.29 při řízení LM.

4.5 Celkový model LCE

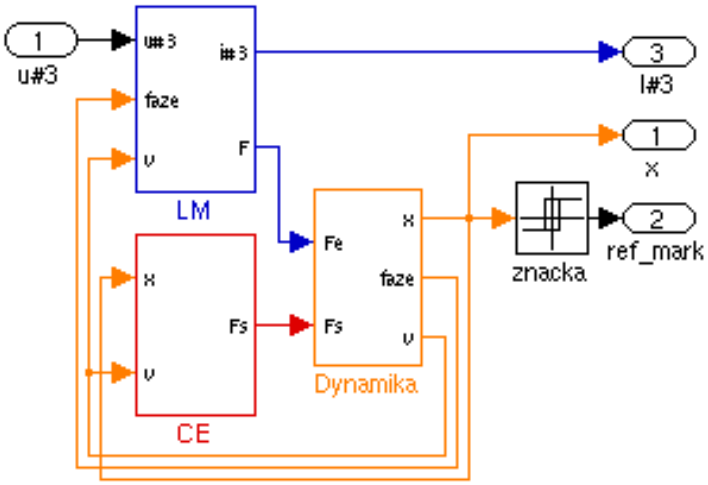
Celkový model se skládá ze čtyř popsaných modelů. Jejich význam a funkce jsou patrné z předchozích částí této kapiloly. Celkový simulační bloček je na obrázku 4.22. Vstupem do LCE je okamžité napětí jednotlivých fází $u\#3$ [15] a výstupem je proud jednotlivých fází $i\#3$, poloha x a referenční signál ref_mark[16], který generuje hranu při průchodu nulovou polohou, tedy středem motoru. Schéma celkového simulačního bločku zachycuje obrázek 4.23. Napětí vstupuje do LM, ten generuje proud a sílu. Síly LM a CE vstupují do modelu dynamiky, z něhož poté vystupuje rychlost, poloha a fáze pohybu. Fáze pohybu je pomocná veličina, jednoznačně ja zadána polohou, v modelu dynamiky se počítá, protože ji vyžaduje LM. Rychlost, poloha a fáze zpětně vstupují do LM a CE.

4.6 Ověření modelu

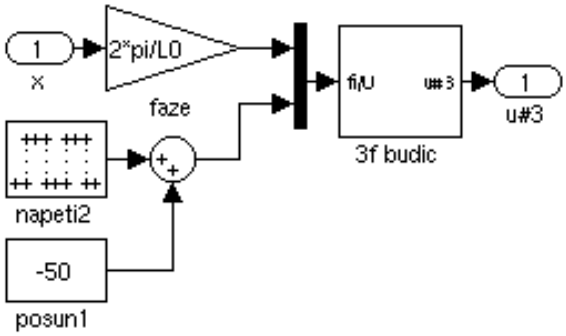
Nyní porovnám činnost modelu s reálným prototypem. Porovnám pouze činnost LM, jen ten lze provozovat bez regulátorů. Celý LCE funguje pouze s regulací, pokud je

[15] Stále se držím konvence označování zvolené v sekci 4.1.1

[16] Tento referenční signál je přidán z důvodu přesné korespondence s reálným modelem. Při takovéto korespondenci je potom možné mít jeden regulátor a pouze přepínat mezi realným modelm a simulací, což značně zjednoduší vývoj.



Obrázek 4.23: Schéma celkového simulačního modelu.



Obrázek 4.24: Schéma budiče pro ověření činnosti LM.

ale soustava regulována, pak je regulátorem zásadně ovlivněno její chování a nelze tedy rozhodnout o správnosti jejího modelu.

Ověření jsem provedl pro tak, že jsem na LM připojil třífázový zdroj s amplitudou obdélníkového průběhu se stejnou kladnou a zápornou částí. Perioda obdélníku je $T = 1s$. Fáze třífazového zdroje je úměrná poloze. Schéma tohoto budiče pro ověření správnosti simulace je na obrázku 4.24. Člen *napeti2* generuje obdélníkové pulzy délky 1s, s amplitudou 70V (resp. 100V). Po odečtení střední hodnoty pulzu (člen *posun1* hodnota -35V resp. -50V) vzniká výše popsaný obdélníkový průběh. Činnost členu *3f budič* je předmětem další kapitoly, kde je podrobně popsána.

Průběhy jsem nejprve porovnával pro amplitudu napětí 35V a poté pro amplitudu 50V. Výsledky obou porovnání jsou v příloze B. První průběh zachycuje obrázek 7.2 a druhý 7.3.

4.7 Pracovní stavy LM

Lineární motor je jádrem celého systému LCE. Jeho úkol je udržovat pracovní podmínky spalovácímu motoru a optimálně odebírat energii vzniklou spálením pracovní směsi. LM může pracovat v režimu generátor, motor i brzda. Porozumění a rozlišení jednotlivých režimů je nutné k návrhu řízení, proto se jím budu nyní zabývat. Při

tom budu používat různé předpoklady a zanedbání a často se budu pohybovat daleko od užití LM na našem prototypu. Držet se budu hlavního cíle - poznat jak se LM chová. V první části se budu předpokládat konstantní rychlost pohybu a budící napětí ve fázi s indukovaným. Teoreticky odvodím závislost výkonu na amplitudě budícího napětí. V druhé části se budu zabývat budícím napětím, které není ve fázi s indukovaným, závěry budu odvozovat z grafů. Ve třetí části se budu zabývat pohybem při nekonstantní rychlosti.

4.7.1 Buzení ve fázi

Při značení napětí se budu držet zvyku, že všechna okamžitá mají označení u a amplitudy napětí harmonických průběhů mají označení U.

Předpokládám, že se motor pohybuje konstantní rychlostí a neuvažuji omezení dráhy. Vyjdu z popisu v sekci 4.1 a budu se zabývat pouze jednou cívkou, neboť zbyté jsou ekvivalentní. Vycházím z obvodové rovnice 4.11, dále z rovnice pro velikost indukovaného napětí 4.10[17] a rovnice 4.12. Pro přehlednost tyto rovnice jěště jednou uvedu, tentokrát již bez popisu, a navážu na ně.

$$u_n + u_i - R\,i + L\,\frac{di}{dt} = 0 \tag{4.30}$$

$$u_i = -K_u\,v\,\sin\left(\varphi_x\right) \tag{4.31}$$

$$u = u_i + u_n \tag{4.32}$$

Z posledních dvou rovnic je zřejmé, že pokud zvolím napájecí napětí

$$u_n = -k\,u_i, \tag{4.33}$$

kde k je konstanta, tak bude fáze celkového napětí stejná jako fáze napětí indukovaného a při malém vlivu indukčnosti (malá rychlost, popř. malý poměr L/R) bude fáze proudu stejná jako fáze napětí[18] a tedy optimální vzhledem k silovým účinkům proudu.

Napájecí napětí u_n tedy volím

$$u_n = k\,K_u\,v\,\sin\left(\varphi_x\right). \tag{4.34}$$

Pak je celkové napětí

$$\begin{aligned} u &= (k-1)\;K_u\,v\,\sin\left(\varphi_x\right) \\ U &= (k-1)\;K_u\,v \end{aligned} \tag{4.35}$$

4.7.1.1 Výkon a síla při zanedbání indukčnosti cívky

Při harmonickém buzení cívky o daném odporu a indukčnosti (což je náš případ) je proud opožděn za napětím. V této části zatím tento posuv uvažovat nebudu, tedy zanedbám vliv indukčnosti. Výsledky poté zobecním s uvážením k nenulové indukčnosti.

[17] Zabývám se jednou cívkou, proto beru jen první ze tří rovnic.

[18] Zdroj zatížen čistě reálnou zátěží.

Elektrický výkon budu značit P_e, aby nedošlo k záměně s mechanickým výkonem, ten budu značit P_m. Pro oba výkony platí, že jsou kladné pokud se výkon spotřebovává a záporné, pokud je výkon získáván.

Výkon je dán (např. dle [5])

$$P_e = \frac{1}{2} U\, I\, \cos(\triangle\varphi), \tag{4.36}$$

kde U a I jsou amplitudy napětí a proudu a $\triangle\varphi$ je jejich fázový rozdíl. Již jsem zmínil, že nyní zanedbávám indukčnost a proto je fázový rozdíl napětí a proudu nulový. Mohu tedy psát

$$P_e = \frac{1}{2} U\, I.$$

Proud je

$$I = \frac{U}{R_v}.$$

S pomocí znalosti proudu a rovnice 4.35 dostávám pro výkon

$$P_e = \frac{K_u\, v}{2\, R_v} \left(k\,(k-1)\right). \tag{4.37}$$

Sílu určím s pomocí vztahu 4.15[19], když do něj za proud dosadím

$$i = I\, \sin(\varphi). \tag{4.38}$$

Protože nyní uvažuji pouze reálnou zátěž, tak je φ rovno φ_x. Dostávám tak

$$F = K_i\, I\, \sin(\varphi_x) \sin(\varphi_x)$$

$$F = K_i\, I\, \sin^2(\varphi_x).$$

Zbývá dosadit za proud I za pomoci rovnice 4.35.

$$I = \frac{U}{R} = \frac{K_u\, v}{R_v}\,(k-1)$$

Síla tedy je

$$F = \frac{K_u\, K_i\, v}{R_v}\,(k-1)\, \sin^2(\varphi_x) \tag{4.39}$$

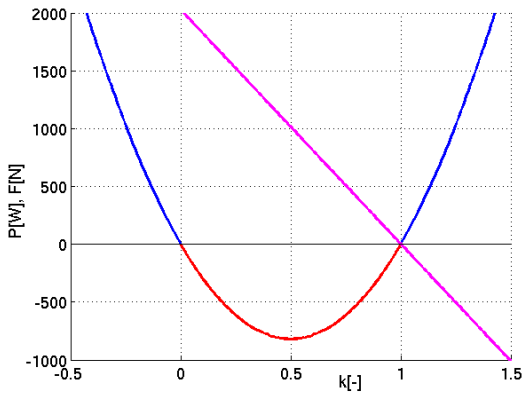
a její střední hodnota

$$\bar{F} = \frac{K_u\, K_i\, v}{2\, R_v}\,(1-k). \tag{4.40}$$

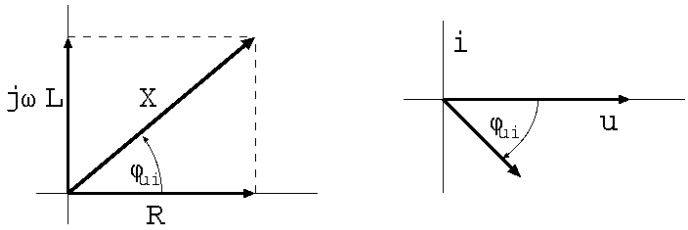
Právě tato hodnota mě zajímá, protože tím přispěje jedna cívka do celkové hodnoty brzdící síly. Celkovou střední sílu a výkon LM získám vynásobením rovnic 4.40 a 4.37 hodnotou tři - z tolika cívek se LM skládá.

Jejich průběh zachycuje obrázek 4.25. Modře a červeně je zobrazen výkon. Modře v oblasti, když se spotřebovává a červeně když se vyrábí. Fialovou barvou je naznačen průběh síly. Graf byl vygerován při těchto hodnotách parametrů $R_v = 12\,\Omega$, $L_v = 0.032\,mH$, $K_u = 54\,V\,m^{-1}\,s$, $K_i = 100\,N\,A^{-1}$ a při rychlosti $v = 3\,m\,s^{-1}$.

[19] Beru první ze tří rovnic.



Obrázek 4.25: Elektrický příkon a síla v závislosti na k.



Obrázek 4.26: Fázorové diagramy cívky LM.

4.7.1.2 Výkon a síla s indukčností

Vliv indukčnosti je v mnoha případech značný a jeho zanedbání vede k velkým nepřesnostech, proto tento vliv budu uvažovat. Stále předpokládám pohyb LM konstantní rychlostí, a tedy harmonické průběhy napětí a proudů. Tyto průběhy popíšu fázory. Vyjdu přitom z fázorového diagramu na obrázku 4.26.

Proud se nyní bude zpožďovat za napětím a bude následující

$$i = I\,\sin\left(\varphi_x + \varphi_{ui}\right), \tag{4.41}$$

kde φ_{ui} je fázový rozdíl proudu ($\varphi_{ui} < 0$), φ_x je fáze pohybu.

Výkon určím přímo ze vztahu 4.36 a to

$$P_e = \frac{1}{2}\,U\,I\,\cos(\varphi_{ui}), \tag{4.42}$$

Sílu určím s pomocí vztahu 4.15[20], když do něj dosadím proud, dostávám tak

$$F = K_i\,I\,\sin\left(\varphi_x + \varphi_{ui}\right)\sin\left(\varphi_x\right).$$

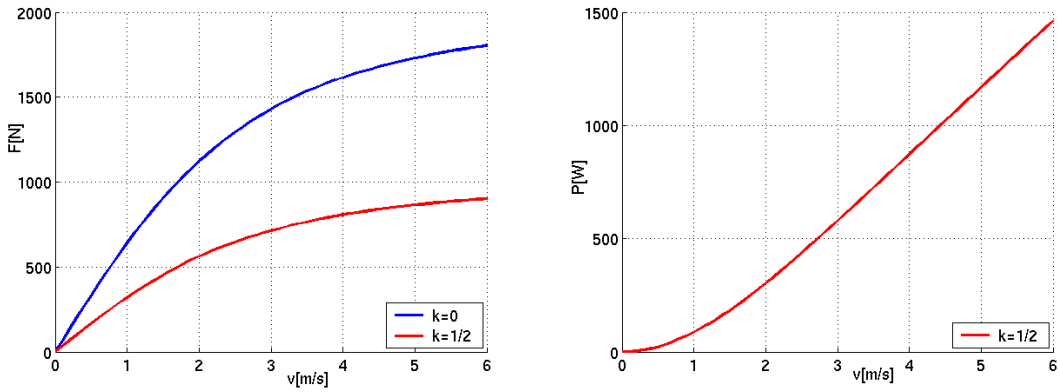
K úpravě použiji goniometrického vztahu

$$\sin(a+b)\,\sin(a) = \frac{1}{2}\left(\cos(b) - \cos(2\,a+b)\right),$$

nyní

$$F = \frac{1}{2}\,K_i\,I\,\left(\cos(\varphi_{ui}) - \cos(\varphi_x + \varphi_{ui})\right).$$

[20]Beru první ze tří rovnic.



Obrázek 4.27: Průběhy výkonu a síly na v a k.

Zbývá dosadit za proud I z rovnice 4.35.

$$I = \frac{U}{R_v} = \frac{K_u\, v}{R_v}\,(k-1)$$

Síla tedy je

$$F = \frac{K_u\, K_i\, v}{2\, R_v}\,(k-1)\,\left(\cos(\varphi_{ui}) - \cos(\varphi_x + \varphi_{ui})\right) \tag{4.43}$$

a její střední hodnota

$$\bar{F} = \frac{K_u\, K_i\, v}{2\, R_v}\,(k-1)\,\cos(\varphi_{ui}). \tag{4.44}$$

Právě tato hodnota mě zajímá, protože tím přispěje jedna cívka do celkové hodnoty brzdící síly.

Výsledky, které jsem získal když jsem indukčnost nezanedbal a nezanedbal se liší pouze faktorem $\cos(\varphi_{ui})$. Graf na obrázku 4.25 tak platí i pro případ, kdy indukčnost nezanedbám, dojde pouze k zmenšení hodnot síly a výkonu zmíněným faktorem. Stále proto platí, že největší výkon zařízení generuje pro $k = \frac{1}{2}$. Graf výkonu a síly v závislostí na rychlosti v s parametrem k zachycuje obrázek 4.27. Byl vygenerovnán na základě rovnic 4.44 a 4.42, kdy jsem použil následující hodnoty konstant. $R_v = 12\,\Omega$, $L_v = 0.032\,mH$, $K_u = 54\,V\,m^{-1}\,s$, $K_i = 100\,N\,A^{-1}$. Fázový rozdíl jsem určil

$$\varphi_{ui} = arctg\left(\frac{\omega\, L_v}{R_v}\right),$$

kde

$$\omega = \frac{2\,\pi}{L}\,v$$

a $L = 0.05\,m$ je délka jednotlivých magnetů rotorů.

V celém odvozování jsem předpokládal pohyb konstantní rychlostí a vycházel ze zvoleného napětí z rovnice 4.34. Tato volba napájecího napětí byla výhodná, neboť změnou parametru k jsem řídil režimy činnosti LM. Tuto činnost zachycuje graf na obrázku 4.25, graf byl vygenerován se zanedbáním indukčnosti LM. Dokázal jsem ale, že tvar grafu se ani při uvážení indukčnosti nemění a pouze snižuje své hodnoty. V závislosti na parametru k pracuje LM dle následující tabulky. (Ta vyplývá ze zmíněného grafu.) Z grafu dále vyplývá, že nejvyšší výkon má motor pro volbu

$k \leq 0$	$P_m \geq 0$	$P_e \geq 0$	brzda
$0 < k \leq 1$	$P_m > 0$	$P_e \leq 0$	generátor
$k > 1$	$P_m < 0$	$P_e > 0$	motor

Tabulka 4.3: Tabulka režimu činnosti LM v závislosti na k.

$k = 1/2$, a při této hodnotě je brzdná síla poloviční oproti brzdné síle při zkratu cívek LM (viz. také obr. 4.27).

Klíčovými předpodlady všech zmíněných závěrů, byla konstantní rychlost a fáze napájecího napětí shodná s fází napětí indukovaného.

4.7.2 Buzení mimo fázi

Nyní opustím předpoklad shodné fáze napájecího napětí s indukovaným a budu zkoumat vliv fázového posunu budícího napětí a koeficientu k na celkový výkon. Vzhledem k náročnosti úlohy ji budu řešit numericky a výsledek uvedu jako graf výkonu P v závislosti na fázovém posunu napájecího napětí φ_U a koeficientu k. Uvedu postup vypočtení výkonu. Všechny veličiny budou harmonické o stejné frekvenci a proto je popíšu fázory.

Fázory indukovaného a napájecího napětí předpokládám následující

$$\begin{aligned} \hat{U}_i &= K_u\, v \\ \hat{U}_n &= k\, K_u\, v\, e^{(j\,(\varphi_U + \pi))}. \end{aligned} \tag{4.45}$$

K fázovému posuvu rovnou přičítám π čímž dosáhnu, že pro nulové φ_U je znaménko napájecího napětí opačné oproti indukovanému. Impedance je

$$\hat{X} = R + j\omega L.$$

Proud určím jako

$$\hat{I} = \frac{\hat{U}_n + \hat{U}_i}{\hat{X}}$$

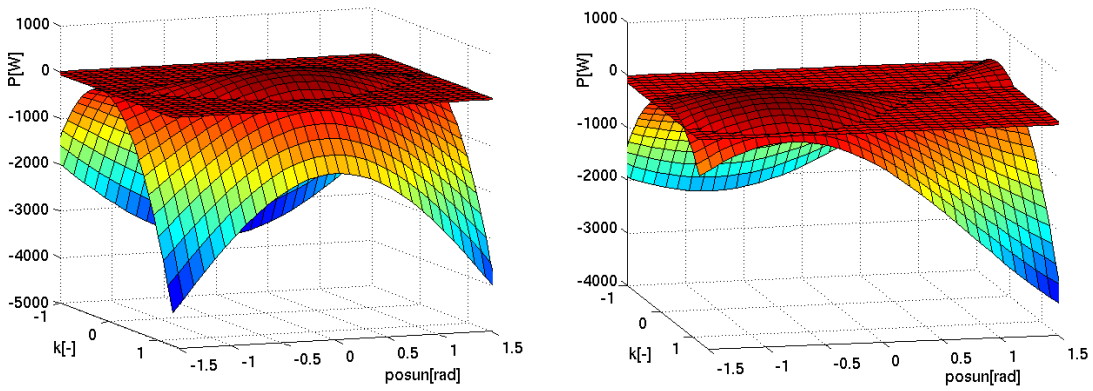
a pro výkon platí

$$P = |\hat{U}_n|\,|\hat{I}|\,\cos\left(\varphi_I - \varphi_U\right). \tag{4.46}$$

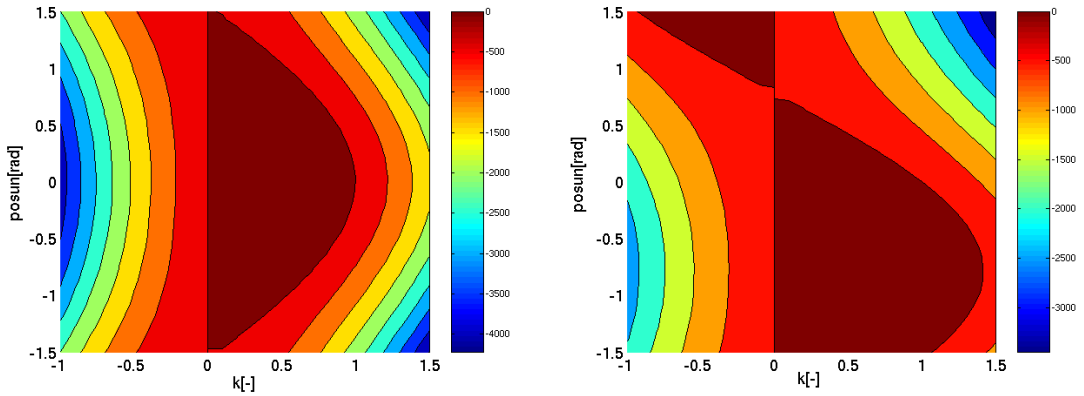
Grafy jsem generoval se zanedbáním indukčnosti i s jejím nezanedbáním, pro tyto hodnoty parametrů $R = 12\Omega$, $L = 0$ (resp. $L = 0.032mH$), $K_u = 50Vm^{-1}s$, $v = 3ms^{-1}$ a $\omega = \frac{2\pi}{L_0}\,v = 428\,rad\,s^{-1}$. Při těchto hodnotách byla fáze impedance $\varphi_{ui} = 0.79\,rad$. Grafy výkonu pro hodnoty $k \in < -1, 1.5 >$ a $\varphi_U \in < -\frac{pi}{2}, \frac{pi}{2} >$ jsou na obrázcích 4.28 a 4.29. Na obou obrázcích jsou dva grafy, kdy vždy levý je při zanedbání indukčnosti a pravý při uvážení indukčnosti. První obrázek zachycuje 3D graf vyrobeného výkonu[21]. Na druhém obrázku v rovině xy vyznačeny vstevnice téhož grafu jako na prvním obrázku. V tomto grafu jsou lépe patrné hodnoty parametrů k a φ_U.

K těmto grafům ještě podotknu, že volba parametru φ_U v intervalu $< -\frac{pi}{2}, \frac{pi}{2} >$ s volbou k kladného i záporného pokrývá všechna možná napájecí napětí, neboť změnou znaménka k dojde k posuvu fáze o π.

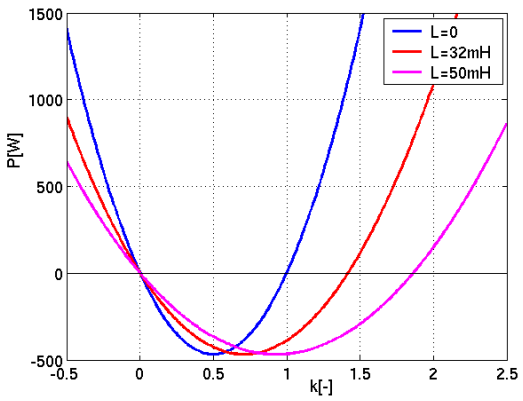
[21] Pro přehlednější výsledek jsem zobrazil záporně vzatou hodnotu výkonu. Pak tedy co je nad rovinou xy je vyrobený výkon a co je pod ní, to je spotřebovaný výkon.



Obrázek 4.28: Graf závislosti výkonu na k a φ_U, s a bez zanedbání L.



Obrázek 4.29: Graf závislosti vyrobeného výkonu na k a φ_U, s a bez zanedbání L.



Obrázek 4.30: Graf průběhu výkonu v závislosti na k a parametru L.

Z grafů s uvážením indukčnosti (pravé grafy) je patrné, že optimální posun napětí φ_U se pohybuje kolem hodnoty $-0.8\,rad$. Tuto hodnotu s opačným znaménkem měla fáze impedance. Z toho tedy soudím, že pro optimální fázi budícího napětí platí[22]

$$\varphi_U = -\varphi_I, \tag{4.47}$$

kde φ_I je fáze impedance. Dále je patrné, že optimální hodnota k není konstantní, ale mění se pro různé fáze impedance. Tento vliv budu nyní zkoumat. Opět to provedu stejným způsobem jako jsem zkoumal vliv indukčnosti.

Tentokrát položím fázi budícího napětí rovnu $\varphi_U = -\varphi_I$ a budu zkoumat vliv k. Parametrem při tom bude indukčnost L, kterou postupně volím $L = 0$, $L = 32mH$ a $L = 50mH$. Ostatní parametry mají tyto hodnoty $R = 12\Omega$, $K_u = 50Vm^{-1}s$, $v = 3ms^{-1}$ a $\omega = 428\,rad\,s^{-1}$. Fáze impedance vyšla pro jednotlivé indukčnosti postupně $\varphi_I = 0$, $\varphi_I = 0.79rad$ a $\varphi_I = 1.1rad$. Graf průběhu výkonu v závislosti na k a parametru L zachycuje obrázek 4.30.

Nejdůležitější fakt, který graf přináší je nezávislost hodnoty maximálního možného vyrobeného výkonu na indukčnosti. Tedy pro každou hodnotu indukčnosti existuje takové buzení dané parametrem k a posunem φ_U, že z cívky dostávám výkon stejný, jako kdyby měla nulovou indukčnost.

Nyní už pouze zbývá zjistit jaké je ono ideální k v závislosti na φ_U [23].

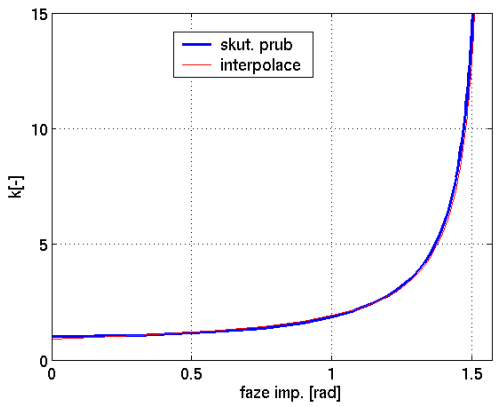
Vlivem indukčnosti roste úhel impedance a tím se závislost výkonu na koeficientu k mění. Mění se hodnota k, pro které je maximální výkon a také hodnota k kdy zařízení přechází z generátorového režimu do režimu motor, tuto mezní hodnotu označím k_M. Její hodnotu jsem zkoumal v závislosti na φ_I. Výkon jsem počítal stále stejně a zaznamenával k_M. Graf je zobrazem na obrázku 4.31.

Byl vygenerován pro konkrétní konstantní hodnoty v, R, K_u změnou hodnot L. Hodnoty v, R, K_u uvádět nebudu, neboť jejich hodnota nemá přímý vliv na k_M. Tyto hodnoty pouze ovlivní fázi impedanci a ta má pak přímý vliv na hodnotu k_M. Zmíněný graf zachycuje průběh k_M a také fukci, kterou tento průběh aproximuji. Funkce je následující

$$k_M = 0.34 - \frac{0.9}{\varphi_I - \frac{\pi}{2}}. \tag{4.48}$$

[22] Tuto skutečnost jsem ověřil pro několik hodnot φ_U.

[23] Pokusem jsem ověřil, že rychlost na průběh výkonu má vliv pouze snížení jeho hodnoty. A na k má vliv pouze φ_I.



Obrázek 4.31: Závislost mezní hodnoty k_M na úhlu impedance.

Obdržel jsem ji proložením napočítané křivky lineární funkcí s koeficienty k_0, k_1

$$k_M = k_0 + k_1\, z,$$

kde

$$z = \frac{1}{x - \frac{\pi}{2}}.$$

K proložení jsem použil metody nejmenších čtverců.

4.7.3 Shrnutí buzení při konstantní rychlosti

V předchozím se ukázalo, že velikost indukčnosti nená vliv na maximální možný výkon generátoru při dané rychlosti. Pro tento výkon je ale se vzrůstající indukčností nutno zvětšovat velikost budícího napětí a jeho fázi dle výše odvozených vztahů.

4.7.4 Vliv nekonstantní rychlosti

Při řízení pro různé rychlosti je nutno přihlédnout k tomu, že proud stavová veličina. A nelze ji skokově změnit. Situace se tím komplikuje. Nelze rozhodnout o vhodném řízení v daný okamžik, ale pouze o vhodné řízení v kontextu okamžitého stavu LM a tedy kontextu předchozího řízení. Tento problém řešit nebudu a budu předpokládat, že vhodné řízení je takové, které v každý okamžik řídí jako by byla rychlost konstatní o velikosti rychlosti okamžité.

Tímto jsem popsal odvození modelu LCE a jeho implementaci a porovnal simulační výsledky LM s naměřenými. Činnost celého motoru, tedy LCE a regulátorů bude ukázána v kapilole 6.

Kapitola 5

Řízení

V této kapitole bude pojednáno o možnostech řízení LCE. Budou představeny různé regulátory, které lze použít a které byly vyzkoušeny. Dále budou ukázány částečné výsledky jak simulační tak reálné. Celkové experimentální výsledky v této kapilole ukázány nebudou, jimy se zabývá kapilola následující.

5.1 Úkoly a části řízení

Úkolem řízení je zajištění optimálního běhu spalovacího motoru, udržení polohy v geometrických mezích, optimální přemena mechanické energie na elektrickou a její odběr. Řízení celého LCE se obecně logicky rozpadá na dvě části. Tou první je **řízení spalování** a tou druhou je **řízení pohybu**. Řízení spalování v sobě zahrnuje řízení

- množství paliva
- množství vzduchu
- polohy vstřiku (typicky volena $-10\,mm$)
- polohy zápalu (typicky volena $-10\,mm$)

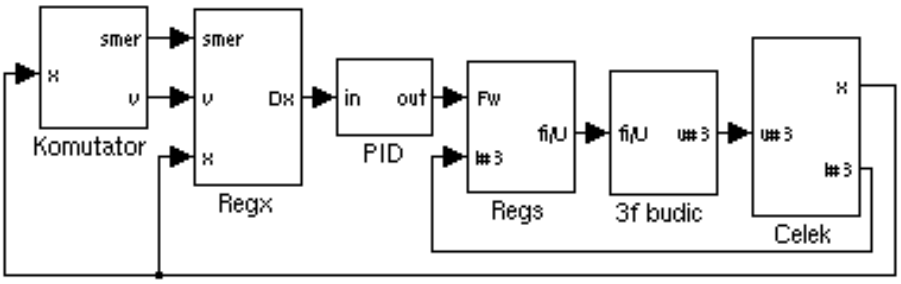
Všechny zmíněné veličiny jsou pouze parametry, které nastavím na vhodné pracovní hodnoty a neměním je za běhu. Na spalování má zásadní vliv kompresní poměr. Ten není dán geometrií jak jsme zvyklí z běžných spalovacích motorů. Je dám horní úvratí a ta závisí na poloze a je tedy ovlivněna druhým regulátorem - regulátorem pohybu. Řízení spalování by výhledově měl zajistit regulátor parametrů CE, který bude pomalý vzhledem k době jednoho spalovacího cyklu. A bude tak tvořit nejvíce vnější smyčku řízení. Dále se budu zabývat pouze řízením pohybu, budu předpokládat, že spalovací motor je v optimu a cílem bude získat co nejvyšší výkon a účinnost.

5.2 Obecné schéma řízení pohybu

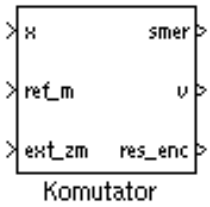
Všechny regulátory, které jsem navrhl vycházejí z obecného schématu řízení ukázaného na obrázku 5.1.

Řízení se skládá z budiče napětí *budic*, regulátoru síly *Regs*, regulátoru polohy *Regx*[1] s vnějším PID regulátorem, ktreré udávají trajektorii motoru, a bločku s

[1] Generuje signál pro řízení - průběh polohy.



Obrázek 5.1: Obecné schéma řízení pohybu.



Obrázek 5.2: Bloček Komutátor.

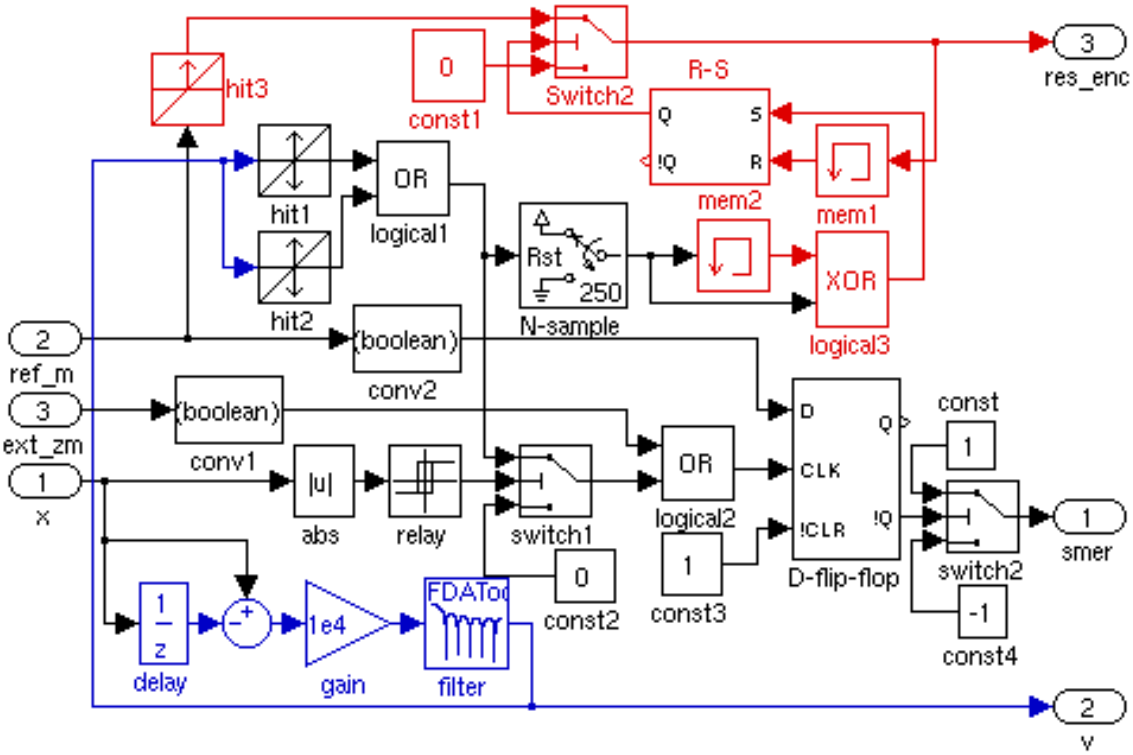
názvem *Komutator*. Bloček *Celek* zastupuje celý LCE. Komutátor slouží pro určení směru pohybu a výpočet rychlosti. Budič generuje třífázové napětí. V zápětí o těchto dvou prvcích pojednám. Celkové schéma využívá díky dvěma regulátorům dvou zpětných vazeb. První zpětná vazba jde od proudu, který přímo souvisí se sílou, druhá zpětná vazva jde od polohy (resp. rychlosti). Této struktury se s výhodou v řízení používá. Celé schéma je pouze blokové, ve skutečnosti je pro řízení použito ještě mnoho pomocných signálů a jednotlivé bločky mají více vstupů a výstupů. Nyní se pustím do rozboru jednotlivých bločků. Bločky *Komutátor* a *Budič* budou stále stejné. U obou typů regulátorů popíšu vzdy alespoň dvě možnosti jak je lze řešit.

5.2.1 Komutátor

Bloček označený jako "Komutátor" jsem takto pojmenoval opět z důvodů jisté analogie s klasickými rotačními elektromotory. Na výstupu je totiž signál směr *smer*, který hodnotami 1 a -1 zachycuje směr pohybu a díky němu pak regulátory obracejí hodnotu napětí, posouvají fázi ap. Další jeho funkcí je výpočet rychlosti v z polohy a generování kalibračního signálu *res_enc* pro inkrementální čidlo. Do bločku vstupuje poloha x a signál z kalibračního čidla polohy *ref_m*. Posledním vstupen je *ext_zm*. Tento vstup slouží pro změnu směru externím signálem, což může být využito regulátorem pohybu. Bloček je zachycen na obrázku 5.2. Jeho vnitřní strukturu zachycuje obrázek 5.3. Prvky pro jednotlivé funkce jsou barevně odlišeny.

Modře je označená část počítá rychlost z polohy na základě rozdílu dvou po sobě jdoucích poloh realizovaným prvkem *delay* a prvkem sčítání. Takto vzniklý signál je zašuměn a proto je následně filtrovám dolnopropustním FIR filtrem řádu 10 se zlomovou frekvencí $\frac{pi}{5}$. Prvek *gain* je součástí výpočtu rychlosti, představuje frekvenci vzorkování.

Černě jsou obarveny prvky sloužící pro generování směru pohybu. Toto gererování funguje tak, že pokud dojde ke změně znaménka rychlosti a stane se tak v



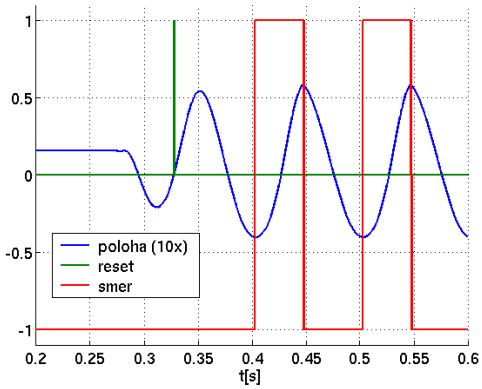
Obrázek 5.3: Bloček Komutátor.

poloze, ve které je změna směru povolena (na okrajích trajektorie), dojde k načtení hodnoty kalibračního čidla polohy (viz. kapitola 3). Načtení je realizováno klopným obvodem typu D *D-flip-flop*, na jehož datový vstup je přiveden signál kalibračního čidla polohy a je řízem hodinovým signálem. Ten přijde prvkem *logical2* buď přímo ze vstupu *ext_zm* a nebo signálem změny znaménka rychlosti jdoucího z *hit1*, *hit2* a *logical1* přes přepínač *switch*, který signál propustí pouze pokud je absolutní hodnota polohy větší než v prvku *relay* nastavená mez 10 mm. Výstupní signál klopného obvodu je převeden z hodnot 0,1 na hodnoty −1,1 prvky *switch2*, *const* a *const4*. Tyto úrovně jsou vhodnější, neboť jimy lze snadno násobit. Prvky *conv1* a *conv2* slouží pouze pro převod datových typů.

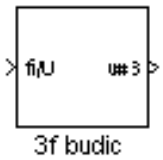
Červeně označené prvky generují kalibrační signál pro čidlo polohy na základě kalibračního čidla[2]. Tento signál je generovám pouze při průjezdu jedním směrem, aby se tak potlačil vliv zpoždění kalibračního čidla a další rušivé jevy. Zároveň je signál generovám pouze jednou při začátku pohybu. Pokud dojde k přerušení pohybu na delší dobu než je 0.5s, tak při následném spuštění bude kalibrační pulz opět generován.

Prvek *hit3* generuje pulz při změně kalibračního signálu. O propuštění pulzu na výstup rozhoduje přepínač *Switch2*. Ten je řízen R-S klopným obvodem *R-S*. Po projití pulzu na výstup dojde k resetu R-S obvodu a do doby jeho nastavením signálem na jeho S vstup nepropouští pulzy na výstup. Na S vstup se dostane pulz v případě že po dobu 0.5s nedojde ke změně znaménka ryclosti. To zajišťuje prvek *N-sample*. Tento prvek je ve stavu aktivním při spuštění simulace a dostane se do tohoto stavu kdykoli pulzem signálu reset na vstupu *Rst*, do neaktivního stavu se

[2]Jeho výstup je 0 nebo 1 podle toho zda je rotor vlevo (resp. vpravo) od svého geometrického středu.



Obrázek 5.4: Ověření činnosti komutátoru.



Obrázek 5.5: Bloček 3-fázového budiče.

dostane z aktivního po 5000 krocích a tedy po 0.5s. Pokud tedy motor pracuje, pak rychlost mění znaménko, prvek *N-sample* je stále v aktivním stavu. Jakmile přestane pracovat mění se stav na aktivní a detektor změny úrovně tvořený prvky *mem2* a *logical3* nastaví klopný obvod *R-S* do aktivního a tím umožní generování kalibračního signálu.

5.2.1.1 Ověření

Obrázek 5.4 ukazuje průběh signálů komutátoru, jak byl naměřen při spuštění motoru buzeného regulátorem na sinusový průběh trajektorie. Zeleně je vyznačen signál resetu enkodéru, k jeho generování dochází při rozběhu a to jen při pohybu správným směrem, červený je signál směru. Modře je vyznačena okamžitá poloha [3].

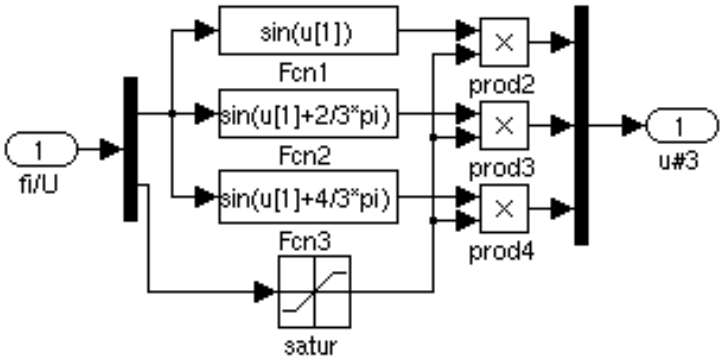
5.2.2 Budič

Budič je koncový stupeň, který ze zadané vstupní fáze *fi* a amplitudy *U* počítá hodnoty napětí jednotlivých fází a zároveň modeluje saturaci[4], kdy omezuje maximální napětí. Výstupem tedy jsou napětí jednotlivých fází. Budič budí jednotlivá napětí vůči sobě posunutá o $\frac{2}{3}pi$. Díky tomuto buzení zůstávají i proudy stále vůči sobě posunuty o $\frac{2}{3}pi$. Bloček budiče je na obrázku 5.5 a jeho schéma na obrázku 5.6.

Na základě fáze se pomocí prvků *Fcn1*, *Fcn2* a *Fcn3* generují tři posunuté sinusovky, jejichž amplituda je následně přenásobena vstupní amplitudou po její saturaci prvkem *satur*. Výsledná trojice napětí je sjednocena do jednoho vodiče pro přehlednější vedení.

[3] Její hodnota je 10-krát zvětšena kvůli názornosti.

[4] To je důležité pro testování na simulačním modelu, v praxi tuto saturaci není třeba modelovat, velikost napětí je sama o sobě omezena.



Obrázek 5.6: Schéma 3-fázového budiče.

Obrázek 5.7: Bloček základního regulátoru síly.

5.3 Řízení síly

Sílu LM nelze přímo měřit. Proto pro její určení ve všech případech používám model silových účinků proudu realizovaný při modelování LM v sekci 4.1.2.4. V této sekci představím tři regulátory jejichž podstatou jsou různé rozdílné přístupy.

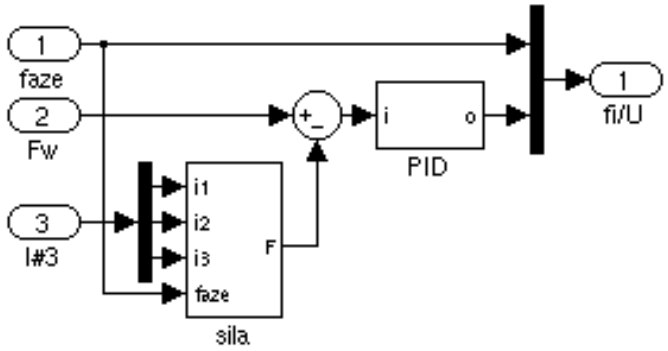
5.3.1 Základní regulátor

5.3.1.1 Princip

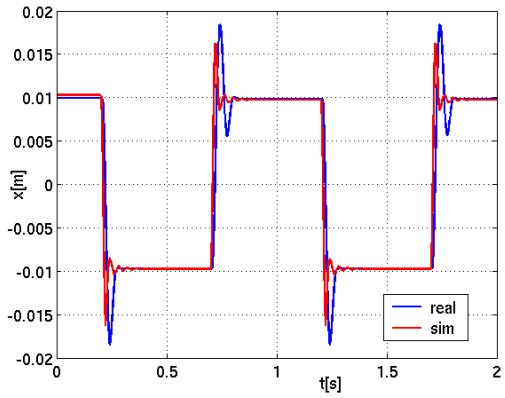
Jako nejjednodušší regulátor se nabízí PID regulátor do něhož vstupuje rozdíl síly požadované a skutečné (resp. určené z proudů a fáze). Jeho bloček ukazuje obrázek 5.7 a schéma obrázek 5.8. Fáze je přímo odvozena od fáze polohy. PID regulátor řídí velikost amplitudy.

5.3.1.2 Ověření

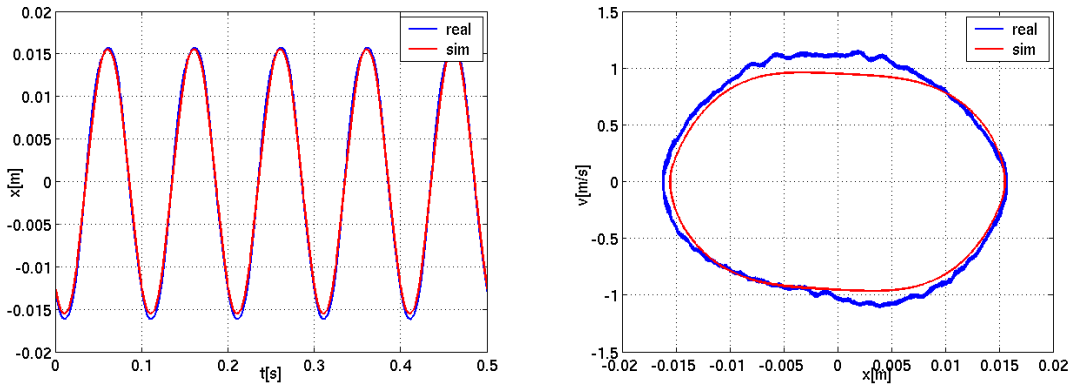
Přímo vyzkoušet regulátor bych mohl, kdybych mohl přímo měřit sílu. To ale nejde. Proto jsem regulátor vyzkoušel ve spojení s PID regulátorem ($P = 10^5$, $D = 10^6$), do kterého vstupuje odchylka polohy. Jedná se tedy o spojení regulátoru síly s regulátorem polohy. Jako žádanou polohu jsem nejprve zvolil obdélník, poté harmonický průběh. Ověření funkce regulátoru jsem provedl na prototypu i na modelu. Výsledek pro buzení obdélníkem je na obrázku 5.9 a výsledek pro buzení harmonickým průběhem na obrázku 5.10.



Obrázek 5.8: Schéma základního regulátoru síly.



Obrázek 5.9: Ověření klasického regulátoru síly - přechodvý děj.



Obrázek 5.10: Ověření klasického regulátoru síly - harmonické buzení.

5.3.1.3 Výsledky

Takovýto jednoduchý regulátor vykazuje velmi dobrou činnost a možnost vybuzení velmi rychlého pohybu LM. Vhodné hodnoty PID regulátoru pro buzení pohybu na reálném modelu byly $P = 10^6$, $D = 10^7$ a $I = 0$. Tyto konstatnty jsem naladil při buzení na sinusový průběh trajektorie s cílem umožnit co možná nejrychlejší pohyb. I s ohledem na to je velká derivační konstanta a nulová integrační. Pro provoz motoru se osvědčily tyto hodnoty parametrů regulátoru $P = 10^5$, $D = 10^6$ a $I = 0$.

5.3.2 Regulátor dle indukovaného napětí

Teto regulár vyšel z teoreticky odvozených faktů ze podsekce 4.7, která se zabývá vhodným buzením LM pro maximalizaci vyrobeného výkonu. Regulátor na rozdíl od základního regulátoru liší ve způsobu výpočtu amplitudy budícího napětí. Odchylka síly skutečné od okamžité neřídí amplitudu, ale koeficient k[5]. Takto navržený regulátor se ale choval naprosto totožně jako základní regulátor. Proto se o něm nebudu více zmiňovat.

5.3.3 Regulátor s vektorovým řízením

Vektorové řízení se hodí pro řízení synchronních a asynchronních strojů při provozu s proměnou úhlovou rychlostí. Vektorové řízení rozkládá proud do tzv. momentotvorné a do tzv. tokotvorné složky a řídí je odděleně. Viz [2] a [7]. Momentotvorná složka určuje moment (resp. sílu) motoru. Tokotvorná určuje velikost magnetického toku. U asynchronního motoru má tokotvorná složka klíčový význam a řídí se na nenulovou konstantu. U synchronního motoru s permanentními magnety je magnetický tok dán těmito magnety, není tedy potřeba tok vybuzovat. Tokotvornou složku proudu pak řídíme na nulu.

5.3.3.1 Princip

Pro popis proudů ve vinutích motoru zavedeme tzv. prostorový vektor proudu, který nám zjednoduší popis problému. Tři proudy statorových vinutí i_a, i_b, i_c jsou mezi sebou svázány konstatním fázovým posuvem. Díky tomuto posuvu je možná popsat všechny současně jedním prostorovým vektorem $\vec{i_s}$. Tento vektor se určí

$$\vec{i_s} = i_a + \alpha i_b + \alpha^2 i_c, \tag{5.1}$$

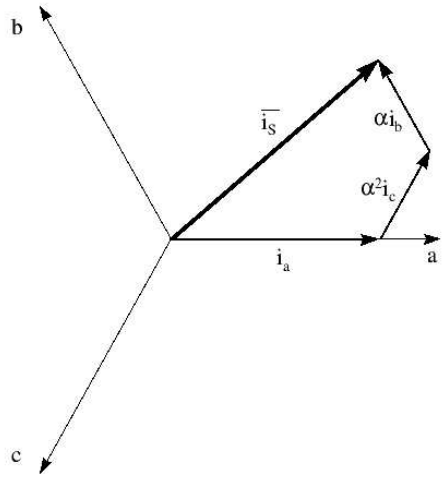
kde $\alpha = e^{j\frac{2}{3}\pi}$. Graficky je tato závislost znázorněna na obrázky 5.11. Dále budeme vektor postupně transformovat do různých souřadných soustav, až obdržíme odděleně tokotvornou a momentotvornou složku.

5.3.3.2 Projekce $(a, b, c) \rightarrow (\alpha, \beta)$

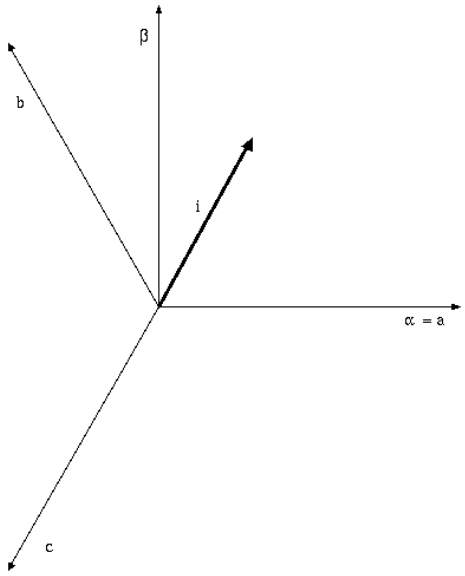
Prostorový vektor jsme dostali v souřadnicích (a, b, c), tato soustava odpovídá souřadnicím statoru. Vektor zde lze jednoduše vyjádřit v souřadnicích α, β soustavy s na sebe kolmými osami. Názorně tuto skutečnost ukazuje obrázek 5.12. Transformaci popisují následující vztahy

$$i_\alpha = i_a \qquad i_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}}\, i_a + \frac{2}{\sqrt{3}}\, i_b. \tag{5.2}$$

[5] Poměr budícího a indukovaného napětí. Viz. kapitola 4



Obrázek 5.11: Prostorový vektor proudu.



Obrázek 5.12: Transformace ze souřadnic (a, b, c) do souřadnic (α, β).

Pro zpětný převod dostáváme

$$i_a = i_\alpha \qquad i_b = -\frac{1}{2}\, i_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}\, i_\beta. \tag{5.3}$$

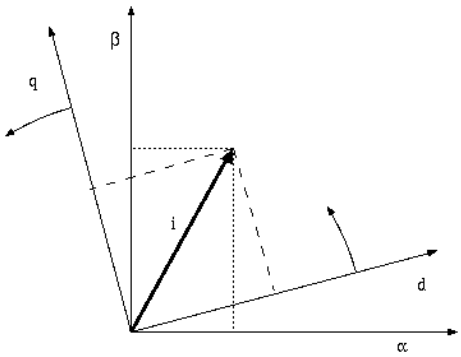
5.3.3.3 Projekce $(\alpha, \beta) \rightarrow (d, q)$

Tato projekce tranformuje proud ze souřadné soustavy spojené se statorem do otáčející se (resp. pohybující se) soustavy spojené s rotorem. Situaci zachycuje obrázek 5.13. Transformace je vyjádřena vztahy

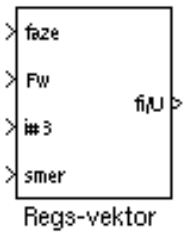
$$i_d = i_\alpha \cos(\theta) + i_\beta \sin(\theta) \quad i_q = -i_\alpha \sin(\theta) + i_\beta \cos(\theta) \tag{5.4}$$

Z toho pro zpětnou transformaci platí

$$i_\alpha = i_d \cos(\theta) - i_q \sin(\theta) \qquad i_\beta = i_d \sin(\theta) + i_q \cos(\theta)\,. \tag{5.5}$$



Obrázek 5.13: Transformace ze souřadnic (α, β) do souřadnic (d, q).



Obrázek 5.14: Regulátor s vektorovým řízením.

Výsledkem rovnice 5.4 jsou požadované složky proudu, i_q je složka momentotvorná, i_d tokotvorná. Řízením momentové složky řídíme moment (resp. sílu) motoru.

5.3.3.4 Aplikace

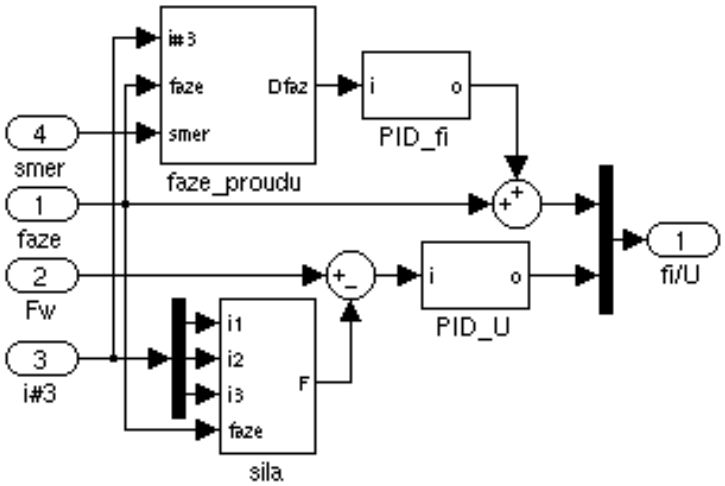
Takto formulované vektorové řízení funguje obecně pro synchronní i asynchronní motory. Nyní vyvodím závěry vektorového řízení pro náš LM. Jak již bylo zmíněno v kapilole 4, náš LM lze přirovnat k synchronnímu stroji s permanentními nagnety a tedy tokotvorná složka nemá význam a požadujeme ji nulovou. Momentotvorná složka řídí sílu. Celkovým smyslem vektorového řízení je udržet fázor proudu rovnoběžný s fázorem napájecího napětí, pak je tokotvorná složka nulová a síla dána amplitudou proudu, kterou řídím amplitudou napětí.

5.3.3.5 Implementace

Implementace vychází z doposud zmíněných faktů o vektorovém řízení. Regulátor využívající vektorové řízení je na obrázku 5.14. Jak je z něho patrné, regulátor potřebuje oproti základnímu regulátoru síly navíc znát směr pohybu.

Obrázek 5.15 ukazuje schéma vektorového regulátoru. Princip funkce je nastíněn již v části Aplikace. Spodní část regulátoru - řízení amplitudy je stejné jako u základního regulátoru síly. Horní část se regulátoru se liší - přibylo řízení fáze. Bloček *faze_proudu* počítá fázový rozdíl proudu oproti fázi pohybu. PID regulátor *PID_fi* přenáší tento rozdíl a ten je přičten k fázi pohybu. Prakticky to znamená, že když se proud zpožďuje za požadovaným průběhem, tak zvětším fázi napětí a tím i proud "popoženu".

Nyní vysvětlím činnost bločku *faze_proudu*. Jeho schéma je na obrázku 5.16. Bloček je složen ze tří větví, kdy všechny počítají totéž a výsledek je průměr. Tento



Obrázek 5.15: Schéma regulátoru s vektorovým řízením.

způsob vede k přesnějšímu určení fáze.

Činnost bločku je postavena na teoretických základech zmíněného vektorového řízení. Konkrétně na implementaci rovnice 5.2 s uvážením fázorového diagramu z obrázku 5.12. Pro fázi proudu pak platí

$$\varphi_I = atan\left(I_a, \frac{1}{\sqrt{3}}\left(I_a + 2\,I_b\right)\right). \tag{5.6}$$

Tato rovnice je implementována v prvcích *faze_stator*[6]. Aplikována je na všechny tři dvojice proudů. Protože jsou jednotlivé fáze posunuty, je nutno tento posuv ubrat. Ubrání posunu realizují prvky *korekce*. Takto třemi způsoby zpočtené fáze se zprůměrují a po odečtení fáze pohybu dostávám posuv fáze proudu. V závislosti na kterou se pohybuju stranu se jedná o zpoždění nebo předstih. Tento fakt realizuje prvek *prod*. Ve schématu se jestě objevují prvky *norm_faze*. Ty následují každou operaci sčítání a odčítání, neboť je stále třeba držet všechny úhly v intervalu $(-\pi, \pi)$[7].

Regulátor byl s úspěchem vyzkoušen, výsledky jeho činnosti jsou shrnuty v kapitole 6.

5.4 Řízení pohybu

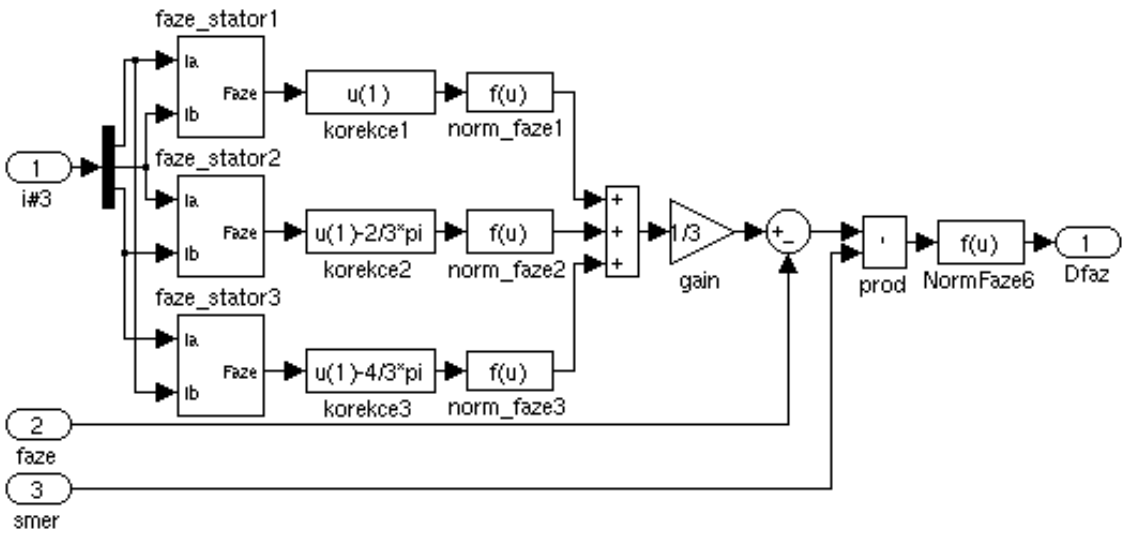
Řízení pohybu řídí trajektorii rotoru s písty. Jeho úkolem je udržet je v geometrických mezích motoru a maximalizovat účinnost přeměny mechanické energie na elektrickou.

5.4.1 Popisy pohybu

Než se pustím do řízení tak je třeba uvědomit si různé možnosti popisu pohybu, jejich výhody a nevýhody. Nabízí se popis $v(t)$, $v(x)$, $x(t)$. Mezi zmíněnými popisy

[6]Implementována je užitím Matlabové funkce *atan2*, která pracuje na celém intervalu $(-\pi, \pi)$

[7]Pokud například dělám průměr ze dvou z stejných úhlů $\frac{1}{6}\pi$, tak potom když si jeden napíšu jako $\frac{13}{6}\pi$, tak dostanu nesprávný výsledek $\frac{7}{6}\pi$.



Obrázek 5.16: Schéma bločku určení fáze proudu.

existuje jednoduchá transformace. Ukážu ji, aby bylo zřejmé jaké jsou mezi nimi vztahy. Začnu zřejmou ekvivalencí $v(t)$ a $x(t)$

$$v(t) = \dot{x(t)} \qquad x(t) = \int v(t). \tag{5.7}$$

Dále ukážu, je zadání $v(x)$ je ekvivalentní s $x(t)$. Vyjdu ze základního vztahu pro dráhu

$$dx = v\,dt,$$

rychlost zde může být zadána jako funkce t nebo x, použiju druhou možnost

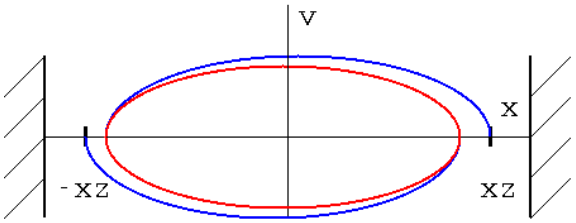
$$dx = v(x)\,dt,$$

následně separací proměnných a integrací

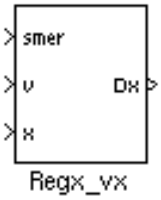
$$t(x) = \int \frac{1}{v(x)}\,dx. \tag{5.8}$$

Nyní už $x(t)$ je inverzní funkce k funkci z rovnice 5.8. Jednotlivé popisy jsou na sebe převeditelné, ale z hlediska řízení se značně liší. Tento rozdíl je patrný hlavně při malých rychlostech v místech změny směru pohybu - v úvatích. Regulátor s popisem pohybu $v(x)$ je v poloze pro kterou předepisuje rychlost blízkou nule. Pokud regulátor síly reguluje s nenulovou odchylkou, poté se může stát, že odchylka rychlosti je velice malá. Tak malá, že její převedení na akční zásah motorem nepohne a dojde k uváznutí. Regulátoru s popisem $x(t)$ se to nestane. Jeho časová základna stále roste a tudíž se dle ní mění i referenční hodnota a tedy zvětšuje chyba řízení - tím akční zásah regulátoru síly.

Kromě zmíněného faktu v případě našeho prototypu měříme polohu až z ní odhadujeme rychlost. Zdá se tedy, že i když jsou regulátory matematicky totožné, z hlediska řízení je výhodnější regulátor s referenční trajektorií jako funkci $x(t)$.



Obrázek 5.17: Referenční a skutečný průběh regulátoru $v(x)$.



Obrázek 5.18: Regulátor polohy typu $v(x)$.

5.4.2 Regulátor $v(x)$

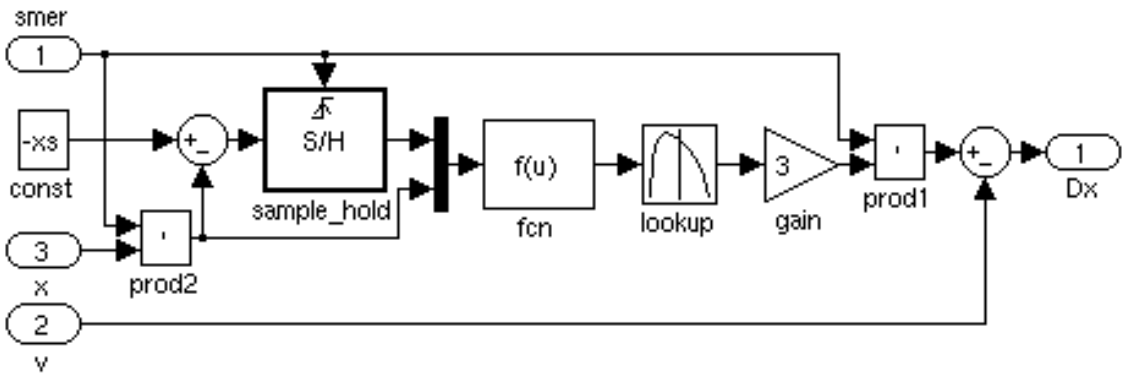
Jak název napovídá, regulátor používá k řízení pohybu rychlost jako funkci polohy. Pro každý bod trajektorie předepisuje požadovanou rychlost a počítá její odchylku od skutečné. Tuto odchylku posílá do PID regulátoru a následně do regulátoru síly.

5.4.2.1 Princip

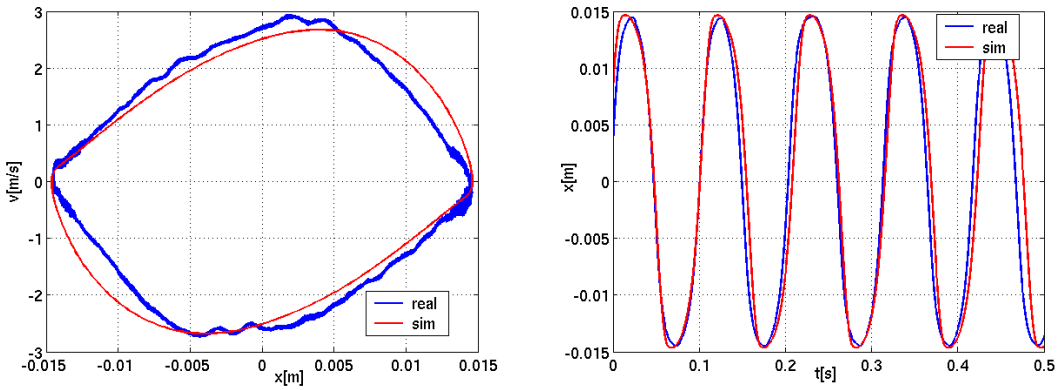
Referenční rychlost má nulovou hodnotu v poloze jež označím $-x_s$ následně roste a poté klesá a nulovou hodnotou, kterou dosahuje v poloze x_s. Za tímto bodem je referenční rychlost záporná a nutí tak skutečnou rychlost projít nulovou hodnotou a tím změnit směr pohybu. Při řízení se vlivem odchylky skutečné rychlosti od referenční stane, že rychlost dosáhne nulovou hodnotu před, nebo po projití polohy x_s. Pak dojde díky Komutátoru ke změně směru pohybu a začíná další cykl. Ten však musí opět vycházet z nulové rychlosti. Znamená to tedy, že reference rychlosti musí mít proměnnou polohu začátku. Tento problém řeším následovně. Při změně směru pohybu začínám nový řídící půlcykl v místě změny. Referenci změním tak, aby v tomto místě začínala a končila v místě x_s. Situaci zachycuje obrázek 5.17. Modře je vyznačena reference a červeně možný průběh rychlosti. Reference vždy navazuje na místo skončení předchozího cyklu a díky tomu je spojitá a bez skoků.

5.4.2.2 Implementace

Simulační bloček regulátoru je na obrázku 5.18 a jeho schéma na obrázku 5.19. Jádrem regulátoru je převodní tabulka rychlosti v závislosti na trajektorii *lookup*. Ta generuje tvar referenční rychlost. Prvek *gain* udává amplitudu rychlosti. Na členu *prod1* dostane rychlost správné znaménko a na koncovém součtovém členu se počítá odchylka požadované od skutečné rychlosti. Prvek *prod2* převádí pohyb "tam" a "zpět" na pohyb pouze "tam", neboť násobí pozici směrem pohybu, takto přenásobenou polohu budu nazývat *spoloha*. Díky spoloze lze snadno popsat referenci. Spoloha vstupuje do součtového členu, kde je odčítána od x_s. Výsledná hodnota



Obrázek 5.19: Struktura regulátoru polohy typu $v(x)$.



Obrázek 5.20: Simulační a reálné průběhy regulátoru $v(x)$.

je v okamžitu změny směru načtena do prvku *sample_hold*. Tento prvek tedy drží odchylku polohy od x_s v místě změny směru. V následném prvku *fcn* je implementována funkce

$$y = \frac{1}{x_s}\left(\frac{2\,x_s - Dx_s}{2\,x_s}\,x + \frac{Dx_s}{2}\right),$$

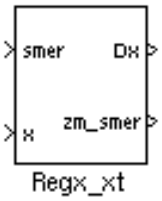
kde x je sploha, x_s je mez pohybu, Dx_s je odchylka začátku reference od x_s. Tato funkce realizuje onen posuv začátku reference.

5.4.2.3 Výsledky

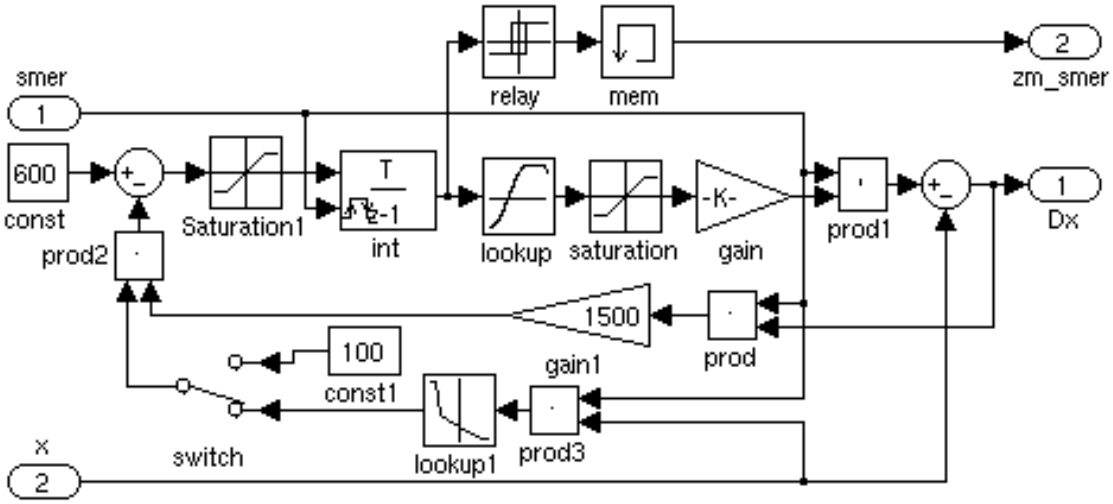
Regulátor jsem vyzkoušel na prototypu i na simulačním modelu. Referenční trajektorie byla volena harmonického průběhu. Výsledky jsou znázorněny na obrázku 5.20.

5.4.3 Regulátor $x(t)$

Tento regulátor využívá popisu trajektorie ve tvaru $x(t)$. Navíc je v něm implementována jakási "tvrdost" s jakou má řídit. Regulátor dokáže uřídit celý systém tak aby generoval elektrickou energii. Regulátor byl vyzkoušen na prototypu, kde dosálh výkonu 500W.



Obrázek 5.21: Regulátor polohy typu $x(t)$.



Obrázek 5.22: Struktura regulátoru polohy typu $x(t)$.

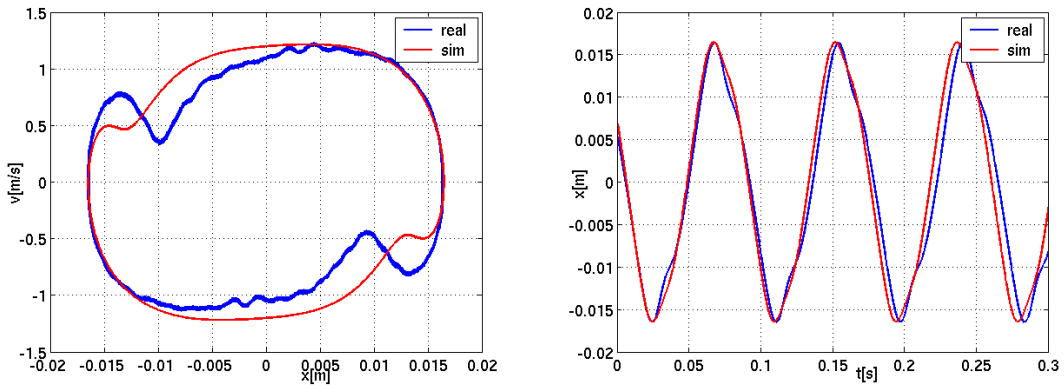
5.4.3.1 Princip

Regulátor se skládá z generátoru času regulátoru, dále z převodní tabulky času regulátoru na požadovanou trajektorii. Čas regulátoru plyne různě rychle v závislosti odchylky trajektorie skutečné od předepsané. Tuto proměnu zajištuje část změny rychlosti plynutí času regulátoru, která navíc závisí na poloze. Myšlenka je taková, že po zápalu můžeme dát pohybu volnost, ale na konci je třeba doregulovat přesně, aby byly připraveny podmínky pro zápal druhém válci. Takto navržený regulátor má tu výhodu, že v případě velké regulační odchylky "počká" až systém odchylku zmenší. To způsobí zpomalení regulace a celkové rychlosti LCE, ale regulátor tak snáze zvládne proměnné energie jednotlivých výbuchů a další poruchy a nestandartní stavy. Regulátor zároveň umožňuje detekovat potřebu změny směru a tak za asistence Komutátoru tento směr změnit.

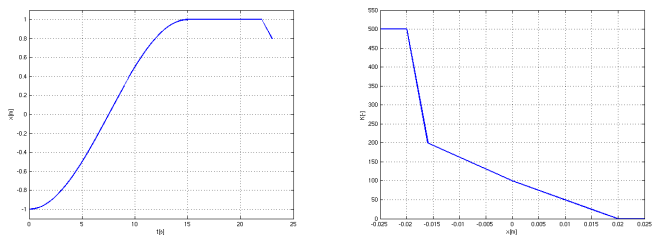
5.4.3.2 Implementace

Blok regulátoru $x(t)$ zachycuje obrázek 5.21. Jeho vstup je poloha a směr pohybu. Výstupem pak odchylka od požadované hodnoty trajektorie a signál změny směru pohybu. Schéma regulátoru zachycuje obrázek 5.22.

Základem jsou prvky pro generování času regulátoru. Jsou to konstanta *const*, prvek saturace *Saturation1* a integrátor *int*. Konstanta definuje základní rychlost běhu času regulátoru. Od ní je odečtena změna rychlosti běhu času regulátoru vypočtená částí změny času regulátoru. Takto zístaná hodnota je saturována tak aby nedošlo k příliš rychlému nebo příliš pomalému běhu. Integrátor je na začátku kaž-



Obrázek 5.23: Simulační a reálné průběhy s regulátorem $x(t)$ bez spalování.



Obrázek 5.24: Funkce implementované převodními tabulkami.

dého cyklu resetován signálem změny směru. Integrátor generuje čas regulátoru, ten se převodní tabulkou *lookup* převádí na požadovný tvar trajektorie a následně zesilovač *gain* určí její amplitudu. Takto se generuje referenční trajektorie pro oba směry. Nezávislost na směru pohybu zajišťují násobící prvky *prod*, *prod1* a *prod2*. Na výstupu *prod1* je referenční trajektorie. Následně vzniká její odchylka od skutečná, která je na výstupu celého regulátoru.

Změna rychlosti běhu času je realizována na násobícím prvku *prod2*, kam přichází resílená odchylka trajektorie a je násobena váhou tvořenou převodní tabulkou *lookup1*. Tabulka udává, jak hodně má odchylka trajektorie ovlivnit rychlost běhu času v závislosti na aktuální poloze. Tuto závislost lze odstranit změnou stavu přepínače *switch*.

Posledním funkční část tvoří spínač *relay* a jednokrokové zpoždění *mem*. Spínač slouží pro případ uváznutí. Pokud cykl trvá již dlouhou dobu - několikanásobně delší, než je doba běžného cyklu, tak spínač sepne a tím pošle signál ke změně směru komutátoru. Zpoždění*mem* slouží pouze aby systém neobsahoval algebraickou smyčku.

5.4.3.3 Výsledky

Takto navržený regulátor se při řízení osvědčil. Díky němu dokázal celý LCE dodávat trvalý výkon 500W. Průběhy při tomto provozu jsou ukázány v následující kapitole 6. Hlavní jeho předností je změna regulace v závislosti na odchylce řízení. Jak je z jeho schématu patrné, jeho činnost je dána dvěma převodními tabulkami. Průběhy byly zvoleny dle grafů na obrázku 5.24.

Zvolit tu nejlepší trajektorii je složitý problém, který není obecně řešitelný. Parametry motoru se budou při jeho činnosti měnit[8]. A tím se budou měnit i nejlepší trajektorie.

[8]Přestože externí smyčka řízení spalování se bude snažit těmto změnám zabránit

Kapitola 6

Výsledky

V této kapitole proberu dosažené výsledky. Nejprve stručně připomenu výsledky jednotlivých regulátorů při buzení LCE bez spalování. A poté shrnu výsledky provozu motoru a zhodnotím vliv jednotlivých regulátorů.

6.1 Regulátory pohybu

Regulátory pohybu jsem navrh a vyzkoušel dva. Oba předepisovali referenční trajektorii v jiném tvaru. První ve tvaru $v(x)$ a druhý ve tvaru $x(t)$. Druhý regulátor obsahoval navíc možnost volby "tvrdosti". Oba dva dokáží řídit pohyb motoru pokud nedochází ke spalování. Průběhy takovéhoto řízení jsou na již dříve uvedených obrázcích 5.20 a 5.23. Oba regulátory byly vyzkoušeny v kombinaci se základním regulátorem síly harmonickým průběbem referenční trajektorie. Druhý regulátor ztrácel krok - neudržel pohyb motoru - již při menších rychlostech. Kromě tohoto faktu mezi nimy nebyl velký rozdíl.

Hlavní rozdíl je ve skutečném provozu LCE. První regulátor se nepovedlo naladit tak, aby tento provoz umožnil. Druhý regulátor provoz LCE umožňoval a dosahoval tak výkonu 500W.

6.2 Regulátory síly

Zmínil jsem tři regulátory síly. Základní regulátor, regulátor se znalostí indukovaného napětí a vektorový regulátor. Druhý a třetí vycházejí z prvního. Regulátor se znalostí indukovaného napětí se choval stejně jako základní. Protože je vektorový regulátor nadstavbou základního, který systém udrží v provozu, nastavil jsem vektorový regulátor na chování základního. Motor rozběhl a zvyšoval vliv vektorového regulátoru - ovlivnění fáze budícího napětí. Libovolnou změnou konstant regulátoru PID, který z výstupu vektorového regulátoru (viz. obr. 5.15) ovlivňoval buzené napětí, klesal výkon celku. Základní regulátor se tedy jevil jako nejlepší.

6.3 Regulátory umožňující provoz LCE

LCE jsme provozovali regulátorem pohybu typu $x(t)$ a základním regulátorem síly. Naměřené průběhy jsou v příloze A, nasimulované v příloze B. Jsou na nich vyznačeny časové průběhy polohy, rychlosti a výkonu, dále velikost rychlosti a výkonu v závislosti na poloze. V přílohách jsou rovněž ukázány jednotlivé p-V diagramy.

Reálně naměřený průběh vykazoval výkon 500W[1]. Jak je vidět z průběhů v příloze, výkon má téměř po celou dobu zápornou hodnotu, která značí generátorový režim LM. Výkon je stejně jako rychlost zvlněn. Toto zvlnění si vysvětluji proměnností vlastností LM s polohou. Pohybem LM se mění vzduchová mezera mezi rotorem a statorem. Zvlnění může být také dáno nedokonale harmonickým polem rotoru. Z reálného průběhu je také patrný rozdíl výkonů jednotlivých válců.

Reálný a nasimulovaný průběh si odpovídají, i když zde jsou patrné jisté rozdíly v tvarech. Na simulaci je vyrábí motor nejvíce v první třetině cyklu po výbuchu, zatímco u reálného průběhu je výkonová špička přibližně uprostřed. Liší se také p-V diagramy špičkou tlaku. U reálného průběhu je špička nižší a méně výrazná, což je pravděpodobně způsobeno netěsnostmi motoru.

Vyrobený výkon pro změřený průběh provozní rychlosti přibližně odpovídal grafu 4.27. A zdá se tedy, že vyšší výkon lze získat pouze zvětšením provozní rychlosti nebo užitím motoru s vyšší napěťovou konstatntou K_u. Zvětšení provozní rychlosti, muže vést k většímu výkonu, ale stále bude při protivýbuchu velká rychlost pístu tedy kinecká energie, která se bude mařit. Proto je vhodnější LM, který bude mít vyšší napěťovou konstantu a bude tedy vyrábět i při nižších rychlostech.

[1] Měřeno externím watmetrem.

Kapitola 7

Závěr

Diplomová práce má dvě části jsou to modelování diskutované v kapitole 4 a řízení diskutované v kapitole 5.

Při modelování jsem se nejprve zabýval jednotlivými částmi a logickými celky. Postupně jsem tam namodeloval funkci lineárního elektromotoru, spalovacího motoru, třífázového řízeného můstku a následně jsem namodeloval dynamiku systému. Tyto celky jsem implementoval v prostředí Matlab/Simulink a jejich propojením vytvořil simulační model celého zařízení. Určil jsem jednotlivé konstanty modelu na základě dokumentace nebo identifikace.

V části modelování jsem se dále zabýval rozborem funkce lineárního motoru. Ten je základem celého systému, neboť jeho prostřednictvím je celý lineární spalovací motor řízen a on přeměňuje mechnickou energii na elektrickou.

Pro ověření správnosti modelu jsem provedl několik pomocných měření, při nichž bylo vypnuto spalování. V těchto měřeních jsem ověřil model LM a dynamiky. Naměřené a nasimulované průběhy spolu dobře korespondovali. Shoda průběhů nebyla stoprocentní. To je dáno kupř. proměnnou vzduchovou mezerou LM.

V části řízení jsem se zabýval řídící strukturou s regulátorem síly společně s regulátorem polohy. U regulátoru polohy jsem diskutoval různé způsoby zadání trajektorie, jako nevhodnější vyšla forma $x(t)$. Navrhl jsem základní regulátor síly vycházející ze znalosti fungování LM. Tento regulátor jsem rozšířil a realizoval tak vektorové řízení. Základní regulátor se ale ukázal jako vhodnější.

S užitím regulátoru polohy ve formě $x(t)$ a základního regulátoru síly se povedlo uvést celé zařízení v činnost. Výkon pak byl 500W.

Navržený regulátor používal odhadnutý tvar referenční trajektorie. Přestože téměř v celém průběhu cyklu byla energie vyráběna, nejde o ideální referenční trajektorii. Do budoucna je třeba zajistit její adaptaci a najít LM s lepšími parametry - s větší napěťovou konstantou.

Diplomová práce byla řešena v rámci projektu vývoje lineárního spalovacího motoru. Více o projektu lze nalézt na jeho domovské stránce www.lceproject.org.

Literatura

[1] Janoušek, V. a Suchánek, V. *Základy silnoproudé elektrotechniky*. Vydavatelství ČVUT, Praha, 2004.

[2] Pavelka, J., Čeřovský, Z. a Javůrek, J. *Elektrické pohony*. Vydavatelství ČVUT, Praha, 1996.

[3] Seborský, S. *Elektrické pohony a výkonová elektronika.* Vydavatelství ČVUT, Praha, 1989.

[4] Novotný, K. *Teorie elektromagnetického pole I.* Vydavatelství ČVUT, Praha, 1998.

[5] Mikulec M., Havlíček V. *Základy teorie elektrických obvodů.* Vydavatelství ČVUT, Praha, 1997.

[6] Němeček P.. *Lineární spalovací motor - doktorandské minimum.* Praha, 2004.

[7] Texas Instruments. Field Orientated Control of 3-Phase AC-Motors [on-line]. Poslední revize 1998-03-01 [cit. 2004-11-15]. http://www-s.ti.com/sc/psheets/bpra073/bpra073.pdf

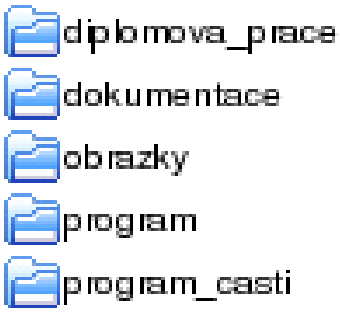
[8] Kirkpatrick A. *Simple Finite Heat Release Model* [online]. [cit. 2004-11-20]. http://www.engr.colostate.edu/ allan/thermo/page6/page6.html

[9] Direct Injection Technology [online]. [cit. 2005-01-10]. http://www.aprilia.com.au/scooters/ditech.html

[10] Roudná J., Zákora L. *Ekologické projekty automobilky Toyota.* [online]. [cit. 2004-12-04]. http://envi.upce.cz/pisprace/starsi/roudna.pdf

Příloha A

Struktura přiloženého CD-ROM



Obrázek 7.1: Struktura přiloženého CD-ROM.

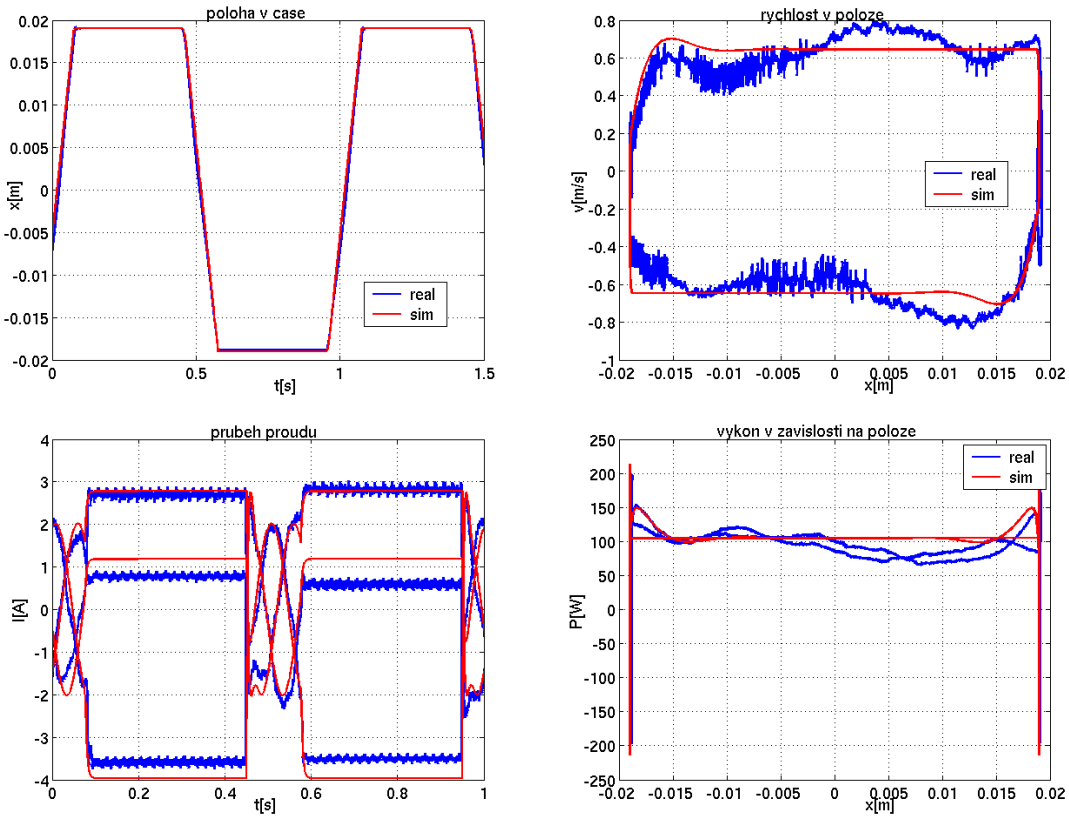
Jednotlivé adrésáře obsahují

- **diplomova_prace** - Tento dokument ve formátu *pdf*.
- **dokumentace** - Dokumantace výrobce k jednotlivým čidlům a částem motoru.
- **obrazky** - Všechny obrázky, které jsem v dokumentu použil.
- **program** - Programy pro Simulink. Adresář obsahuje *celek_sim.mdl* - celkový simulační model včetně regulátorů, mezi jimiž lze přepínat. Dále je v adresáři *celek_real.mdl* - obsahuje propojení na hardware a vytvořené regulátory. Jeho přeložením a nahráním do řídícího počítače LCE lze motor řídit. Před spuštěním obou programů je třeba spustit přiložený m-file *init.m* příkazem *init*, tím se do workspace Matlabu zavedou všechny potřebné konstanty.
- **program_casti** - Poslední adresář obsahuje jednotlivé bloky simulace (kupř. model LM, model dynamiky) v jednoduchém zapojení, ve kterém je demonstrována jejich funkce.

Příloha B

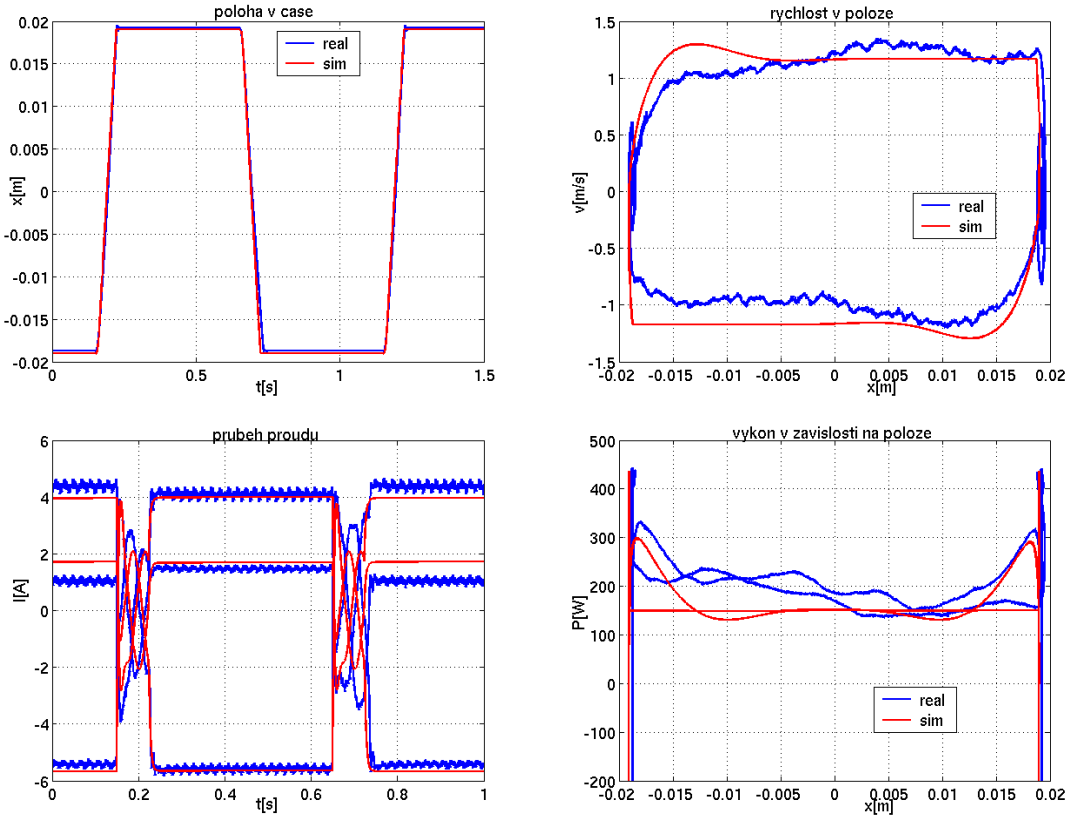
Ověření modelu LM

Průběhy při buzení 35V



Obrázek 7.2: Průběhy při napětí 35V.

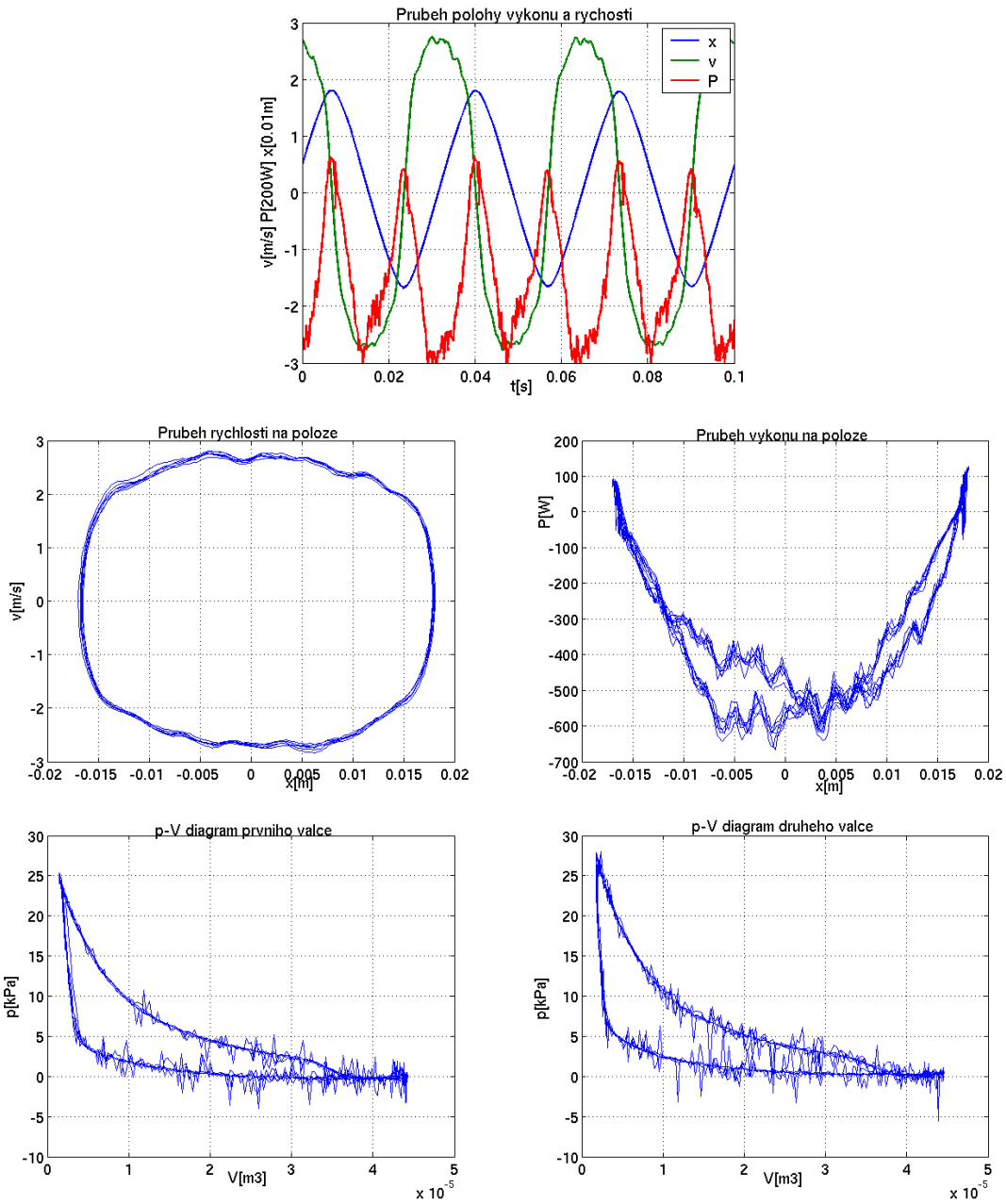
Průběhy při buzení 50V



Obrázek 7.3: Průběhy při napětí 50V.

Příloha C

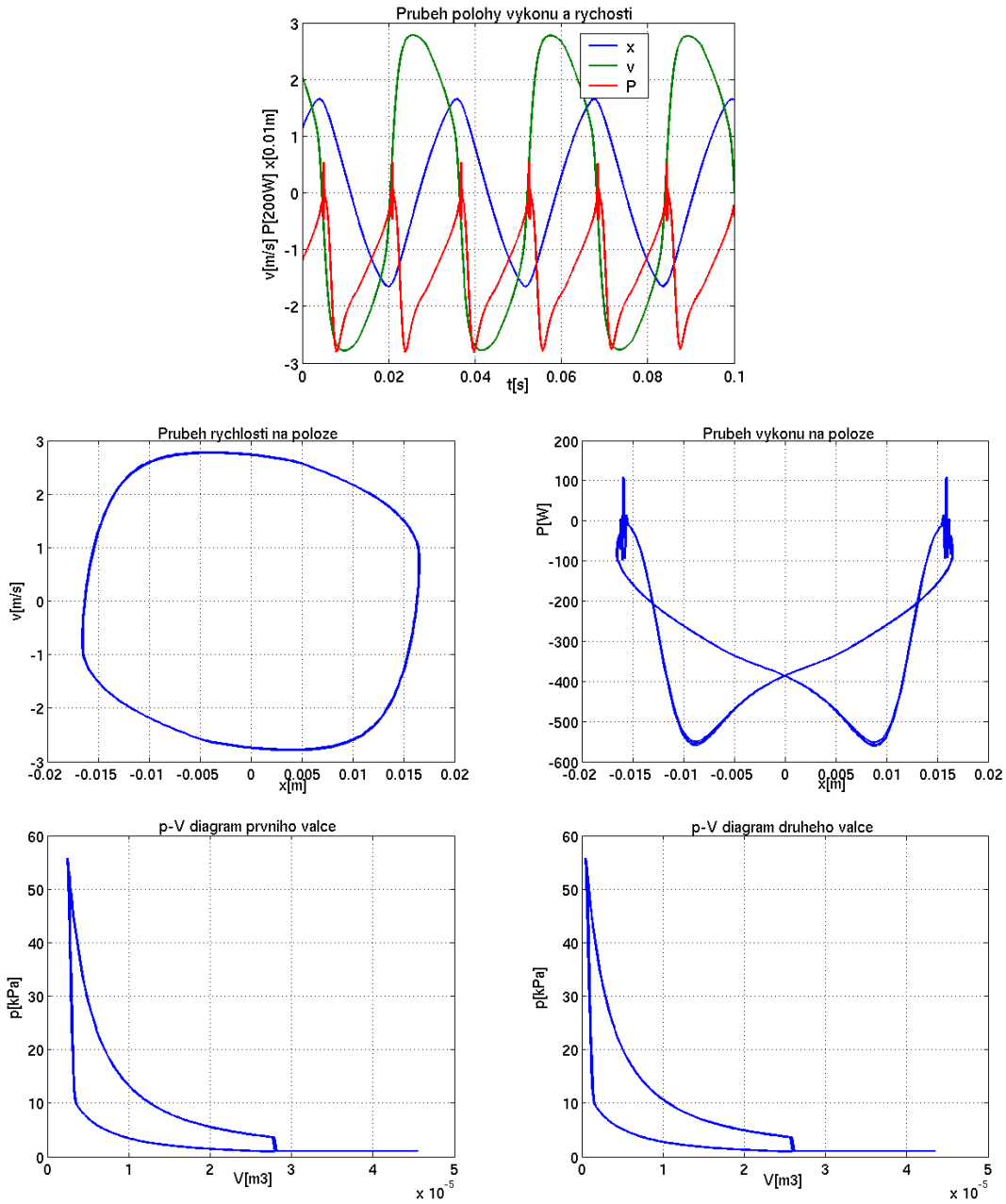
Naměřené průběhy činnosti celku



Obrázek 7.4: Výsledky naměměřené na prototypu.

Příloha D

Nasimulované průběhy činnosti celku



Obrázek 7.5: Výsledky nasimulované.