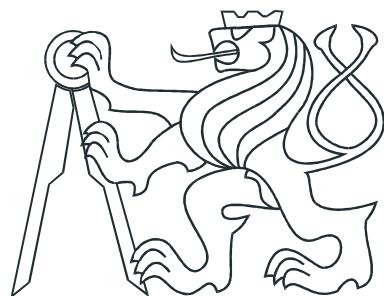


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Pasivní tlumení automobilu s lineárním  
elektrickým motorem**

Praha, 2009

Autor: Miloš Kruml

## **Prohlášení**

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

V Praze dne

---

podpis

## **Poděkování**

Děkuji především vedoucímu svojí bakalářské práce doc. A.Stříbrskému CSc. za pomoc při vytváření této práce a za poskytnutí materiálů pro její zpracování. Dále také děkuji ing. J.Honců Csc. za poskytnutí materiálů pro vývoj model motoru a konzultace ohledně modelu motoru a v neposlední řadě také všem dalším vyučujícím, kteří mi předávali zkušenosti a vědomosti během celé bakalářské etapy studia. Chtěl bych také poděkovat svojí rodině, která mi toto studium umožnila a během celého studia mne podporovala.

# Abstrakt

Model pasivního odpružení automobilu s lineárním elektrickým motorem je systém, který vychází z konvenčního pasivního tlumícího systému. Jediný rozdíl je, že tento systém využívá namísto klasického kapalinového tlumiče lineární elektrický motor.

Pohybem rotoru lineárního elektrického motoru vzniká mezi statorem a rotorem magnetický indukční tok, který vyvolává tok elektrického proudu. Tato část procesu v systému rekuperuje energii, jelikož lineární elektrický motor v této specifikaci pracuje jako generátor.

Cílem mé bakalářské práce je navrhnout parametry tohoto lineárního elektrického motoru, tak aby výsledný systém pracoval co nejefektivněji, což pro mne v tomto případě znamená zajistit optimální tlumící vlastnosti celého systému. Součástí toho nastavení je také sledovat množství energie, které jsme schopni rekuperovat.

# Abstract

The model of automotive passive suspension with linear electrical motor is system, which is coming-out from conventional passive suspension system. The only difference is that this system use linear electrical motor instead of liquid damper.

Move of rotor of linear electrical motor cause the rise of magnetic flux between rotor and stator, which cause current flux. This part of dumping process regenerate energy cause the linear electrical motor in this specification works as generator.

The goal of my bachelor's work is to design parameters of this linear electrical motor that the final system works as much effectively as is possible which in this case means for me to get optimal dumping characteristics of whole system. Part of this setting is also to observe amount of energy which is able to generate.

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická

Katedra řídicí techniky

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: Miloš Kruml

Studijní program: Elektrotechnika a informatika (bakalářský), strukturovaný  
Obor: Kybernetika a měření

Název tématu: Pasivní tlumení automobilu s lineárním elektrickým motorem

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s vlastnostmi lineárního elektrického motoru.
2. Posudte možnosti jeho využití pro systém pasivního tlumení pérování automobilu.
3. Navrhněte řízení proudu tohoto motoru tak, aby pracoval jako pasivní tlumič s možností rekuperace energie.
4. Ověřte chování systému pasivního tlumení pomocí simulací v prostředí Matlab.

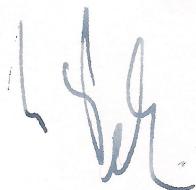
Seznam odborné literatury:

Dodá vedoucí práce

Vedoucí: Doc.Ing. Antonín Stříbrský, CSc.

Platnost zadání: do konce zimního semestru 2009/10

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.  
vedoucí katedry



doc. Ing. Boris Šimák, CSc.  
děkan



V Praze dne 27. 2. 2009

# Obsah

<b>Seznam obrázků</b>	vii
<b>Seznam tabulek</b>	ix
<b>1 Úvod</b>	1
<b>2 Lineární motor</b>	3
2.1 Vlastnosti lineárních motorů . . . . .	3
2.1.1 Technické parametry motorů . . . . .	4
2.2 Konstrukční uspořádání . . . . .	5
2.3 Konstrukce motoru . . . . .	6
2.3.1 Mechanický podklad - Základová deska . . . . .	6
2.3.2 Lineární vedení . . . . .	6
2.3.3 Měřící systém . . . . .	7
2.3.4 Kabelové vedení . . . . .	7
<b>3 Využití motoru v praxi</b>	9
3.1 Specifikace pro tlumení . . . . .	9
3.2 Návrh využití . . . . .	11
<b>4 Řízení proudu motoru</b>	12
4.1 Řídící proud . . . . .	12
4.2 Simulace pro různé řídící proudy . . . . .	13
<b>5 Simulace chování</b>	15
5.1 Model . . . . .	15
5.1.1 Model systému . . . . .	15
5.1.2 Diferenciální pohybové rovnice . . . . .	16

5.1.3	Model motoru . . . . .	16
5.1.4	Výsledný model systému . . . . .	18
5.2	Simulace . . . . .	19
5.2.1	Úvod . . . . .	19
5.2.2	Vlastnosti simulací . . . . .	19
5.2.3	Celková odezva systému . . . . .	20
5.3	Rekuperace energie . . . . .	27
5.3.1	Podmínky pro přeměnu mechanické energie na elektrickou . . . . .	27
5.3.2	Hodnoty narekuperované energie . . . . .	28
5.4	Srovnání s konvenčním systémem . . . . .	30
<b>6</b>	<b>Závěr</b>	<b>37</b>
<b>Použité materiály</b>		<b>38</b>
<b>A</b>	<b>Model systému</b>	<b>I</b>
A.1	M-file <i>data.m</i> . . . . .	II
A.2	Model . . . . .	IV
<b>B</b>	<b>Lineární elektrický motor</b>	<b>XI</b>
<b>C</b>	<b>Obsah přiloženého CD</b>	<b>XVII</b>

# Seznam obrázků

2.1	Srovnání lineárního a rotačního motoru . . . . .	4
2.2	Lineární motor . . . . .	5
2.3	Lineární motor - Elektroválec . . . . .	6
2.4	Lineární motor . . . . .	7
2.5	Schéma lineárního vedení . . . . .	8
2.6	Snímací hlavice . . . . .	8
3.1	Lineární tlumič . . . . .	10
4.1	Průběh proudů . . . . .	12
4.2	Celková odezva systému . . . . .	13
5.1	čtvrtinový model odpružení automobilu . . . . .	16
5.2	Model motoru . . . . .	17
5.3	Model systému . . . . .	18
5.4	Odezva systému na skok . . . . .	20
5.5	Odezva systému na skok . . . . .	20
5.6	Odezva systému na Sinus, $f = 0,25$ Hz . . . . .	21
5.7	Odezva systému na Sinus, $f = 0,5$ Hz . . . . .	21
5.8	Odezva systému na Sinus, $f = 1$ Hz . . . . .	22
5.9	Odezva systému na Obdlník, $f = 0,25$ Hz . . . . .	22
5.10	Odezva systému na Obdlník, $f = 0,5$ Hz . . . . .	23
5.11	Odezva systému na Obdlník, $f = 1$ Hz . . . . .	23
5.12	Odezva systému na Pilu, $f = 0,25$ Hz . . . . .	24
5.13	Odezva systému na Pilu, $f = 0,5$ Hz . . . . .	24
5.14	Odezva systému na Pilu, $f = 1$ Hz . . . . .	25
5.15	Odezva systému na náhodný signál . . . . .	25
5.16	Schéma systému se synchronním motorem . . . . .	27

5.17	Model pro srovnání systémů . . . . .	30
5.18	Srovnání - Skok nahoru . . . . .	31
5.19	Srovnání - Skok dolů . . . . .	31
5.20	Srovnání - Sinus, $f = 0,25\text{Hz}$ . . . . .	32
5.21	Srovnání - Sinus, $f = 0,5\text{Hz}$ . . . . .	32
5.22	Srovnání - Sinus, $f = 1\text{Hz}$ . . . . .	33
5.23	Srovnání - Obdelník, $f = 0,25\text{Hz}$ . . . . .	33
5.24	Srovnání - Obdelník, $f = 0,5\text{Hz}$ . . . . .	34
5.25	Srovnání - Obdelník, $f = 1\text{Hz}$ . . . . .	34
5.26	Srovnání - Pila, $f = 0,25\text{Hz}$ . . . . .	35
5.27	Srovnání - Pila, $f = 0,5\text{Hz}$ . . . . .	35
5.28	Srovnání - Pila, $f = 1\text{Hz}$ . . . . .	36
5.29	Srovnání - náhodný signál . . . . .	36
A.1	Model kompletního systému . . . . .	IV
A.2	Model odpružení s lineárním motorem . . . . .	V
A.3	Model lineárního motoru . . . . .	VI
A.4	Dynamika rotoru . . . . .	VII
A.5	Suma F . . . . .	VII
A.6	Elektrická část . . . . .	VIII
A.7	1.Fáze . . . . .	VIII
A.8	Model pro srovnání systémů . . . . .	IX
A.9	Model systému s kapalinovým tlumičem . . . . .	X

# Seznam tabulek

2.1	Parametry motorů	4
4.1	Odezvy systému	14
5.1	Význam symbolů použitých u schématu modelu	15
5.2	Seznam simulací	26
5.3	Hodnoty rekuperace	29

# Kapitola 1

## Úvod

Tlumící systémy vozidel se snaží filtrovat negativní vlivy způsobené nerovností vozovky během jízdy a tím zajišťují komfort posádky, optimální jízdní vlastnosti a zabraňují zvýšenému mechanickému opotřebování dalších dílů vozidla.

Komfort posádky, jízdní vlastnosti a životnost některých dílů jsou ovlivněny hlavně hmotností, tuhostí karoserie, tlumícím systémem a váhou neodpružené hmoty vozidla (kola, brzy, atd...).

Pasivní systém tlumení obsahuje pasivní tlumič, což znamená, že jeho parametry jsou neměnné a musí vyhovovat všem provozním podmínkám (stav vozovky, styl jízdy, počasí, převážená hmotnost). Tento systém se tedy musí nastavit tak, aby mohl fungovat za všech těchto podmínek, proto není ideálním řešením ani pro jednu nastalou situaci, ale je komplexním řešením, jehož výhody jsou jednoduchá konstrukce, nenáročnost na údržbu, životnost a nižší cena než u systému s aktivním tlumícími členy.

Základ takového pasivního systému je pružina a pasivní tlumič na každém kole vozu. V této práci nahrazuji klasický kapalinový tlumič lineárním elektrickým motorem a vytvářím matematický model pasivního tlumení odpružení čtvrtinového modelu automobilu, simuluji jeho chování a řídím tok proudu motorem, čímž získám různé tlumící vlastnosti výsledného systému.

Práce je rozdělena na kapitoly z nichž druhá přibližuje čtenáři samotný lineární elektrický motor, jeho základní fyzikální principy, konstrukční usporádání a základní technické parametry dnešních lineárních elektrických motorů.

Ve třetí kapitole se snažím stanovit základní požadavky lineárního motoru pro jeho práci jakožto tlumiče a posoudit možnost jeho využití pro systém pasivního tlumení pérování automobilu.

Ve čtvrté kapitole se pokouším upravovat tok proudu motorem tak, aby pracoval jako pasivní tlumič a stanovuji nastavení řízení toku proudu motorem pro různé tlumící charakteristiky pérování automobilu.

V páté kapitole vytvářím čtvrtinový model systému pasivního tlumení automobilu a pomocí simulací testuji jeho chování na různé vstupní signály (profil vozovky) v prostředí Matlab Simulink. Dále popisuji podmínky pro zpětné získávání energie a stanovuji předpokládané množství rekuperované energie.

# Kapitola 2

## Lineární motor

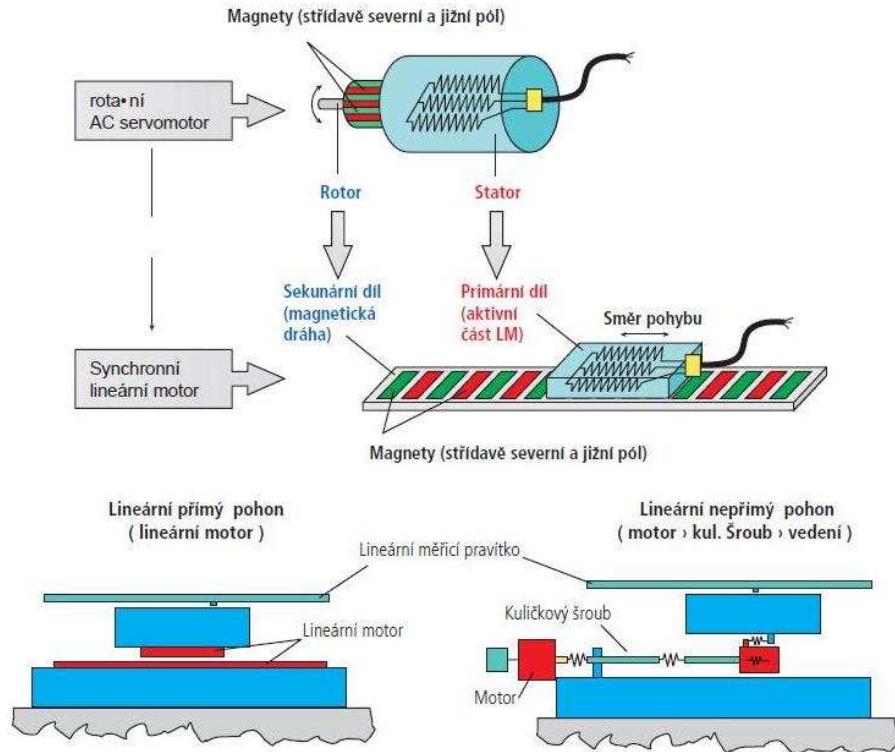
### 2.1 Vlastnosti lineárních motorů

Lineární motor jakožto každý elektromotor přeměňuje elektrickou energii na mechanickou. Na rozdíl od klasického rotačního motoru však nevykonává pohyb rotační, ale posuvný. Pracuje v přímce a ne v kruhu. Můžeme si ho tedy představit jako část rotačního motoru s nekonečným průměrem.

Jako rotační motor má i lineární motor pohyblivou část (*primární oddíl*) a stator (*sekundární oddíl*). Lineární motor má oproti konvenčnímu rotačnímu elektromotoru mnoho výhod, ale i nevýhod. Mezi největší přednosti lineárních motorů patří rychlosť posuvu (až  $40 \text{ m.s}^{-1}$ ), přesnost polohování (až  $0,001 \text{ mm}$ ) a lepší dynamika (až  $300 \text{ m.s}^{-2}$ ). Největšími nevýhodami těchto motorů jsou jejich cena, problémy s kably určenými pro přívod energie a samotná mechanická konstrukce (hlavně uchycení motoru).

Hlavním důvodem proč se dnes lineární motory nepoužívají ve větší míře je jejich cena, proto se dnes dává často přednost konvenčním rotačním motorům ve spojení s převodovkou. Tento způsob pohybu je v mnoha průmyslových aplikacích na mezi dynamiky, což je dáno dynamikou motoru a setrvačnými hmotami převážně převodového ústrojí, a také na mezi přesnosti dané mechanickými vůlemi a postupným opotřebením jednotlivých dílů. Konvenční rotační pohon vykazuje v místech převodu značné tření, pružnost a vůli. U lineárního motoru tyto nevýhody odpadají a přesnost polohování je závislá na typu řídícího a měřícího systému.

Srovnání posuvného pohybu zajištěného lineárním a konvenčním rotačním elektrickým motorem s převodovým ústrojím (viz obr. 2.1).



Obrázek 2.1: Srovnání lineárního a rotačního motoru

### 2.1.1 Technické parametry motorů

Pro ukázku uvádíme v tabulce některé parametry dnešních lineárních motorů.

Tabulka 2.1: Parametry motorů

parametr	hodnota
posuvná síla	100-20.000 N
výkon	2-100 kW
maximální rychlosť	$45 \text{ m.s}^{-1}$
maximální zrychlení	$300 \text{ m.s}^{-2}$
nejvyšší přesnost	0,001 mm
velikost	i přes 100 m

Hodnoty maximálního zrychlení a maximální rychlosti motoru jsou navzájem nepřímo úměrné - motor, který je schopen zajistit zrychlení v řádu stovek  $\text{m.s}^{-2}$ , má maximální rychlosť posuvu v řádu jednotek  $\text{m.s}^{-1}$ .

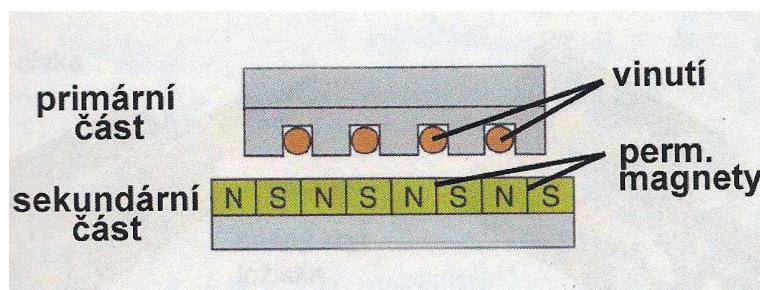
K rozvoji lineárních elektrických motorů dnes dochází hlavně kvůli těmto skutečnostem:

- Cena - motor je stále ne zcela konkurenceschopný kvůli svojí pořizovací ceně
- Mechanické provedení - sestavení, dodržet vzduchovou mezeru, počítat s přitažlivými silami
- Elektřina - je třeba napájet stator, což je ve velkých rychlostech složité
- Regulace - stále se snažíme zdokonalit a měřící a řídící systémy celého motoru

## 2.2 Konstrukční uspořádání

Lineární motory se dnes vyrábějí v synchronním a asynchronním provedení. Méně využívané synchronní motory nacházejí uplatnění převážně v aplikacích požadujících velké zrychlení posuvu. V praxi je nejpoužívanějším typem asynchronní třífázový lineární motor, který má dvě základní konstrukční varianty.

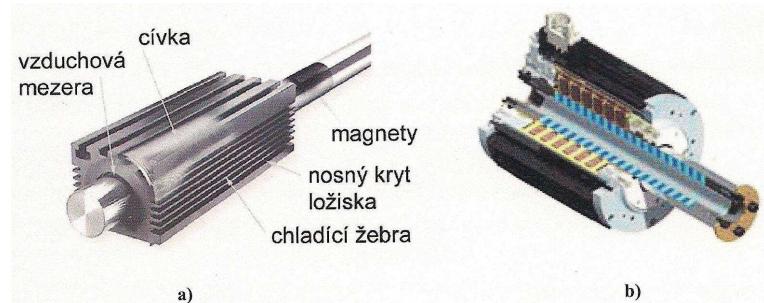
První uspořádání (viz obr. 2.2) je takové, že stator motoru je tvořen střídajícími se permanentními magnety a rotor obsahuje vinutí. Toto uspořádání má dvě hlavní nevýhody. První je nutnost použití speciálních přívodních kabelů vinutí (rotor má obrovské zrychlení - enormní fyzická zátěž kabeláže) a druhou nevýhodou je problémové chlazení vinutí. Výhodou tohoto uspořádání je to, že pro zvětšení maximální délky posuvu rotoru stačí přidat další permanentní magnety do statoru.



Obrázek 2.2: Lineární motor

Druhé konstrukční uspořádání (viz obr. 2.3) má vinutí umístěné ve statoru a rotor je tvořen permanentními magnety. Největším problémem této konstrukční varianty je přitažlivá síla obou dílů směřující kolmo k sobě, která je několikrát větší než síla posuvná. To způsobuje enormní tření. Proto se používá buď zdvojená varianta motoru nebo

celkově nejlepší, varianta elektroválce. Toto uspořádání kompenzuje kolmé přitažlivé síly a zajišťuje ochranu proti nečistotám, které se mohou usadit na rotoru. Dále se zde lépe využívá pole vytvářené permanentními magnety (menší rozptylové toky) a nenastává také problém s chlazením a přívodním vedením. Více o konstrukčních variantách v [1].



Obrázek 2.3: Lineární motor - Elektroválec

## 2.3 Konstrukce motoru

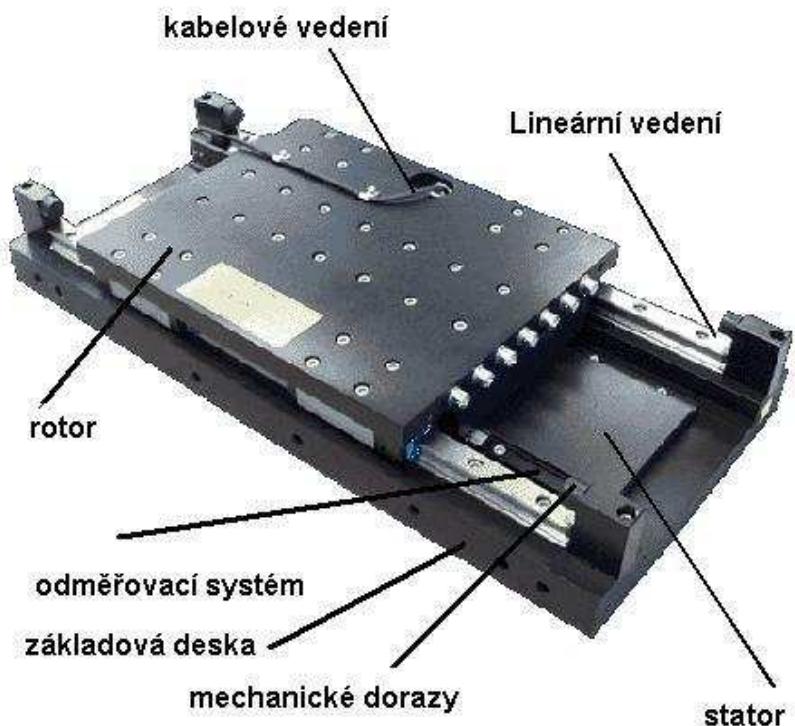
Většina lineárních motorů (viz obr. 2.4) se skládá ze základové desky, lineárního vedení, měřícího systému a kabelového vedení. Přesná specifikace záleží na konkrétním modelu motoru a hlavně na variantě konstrukčního uspořádání (více v [1]).

### 2.3.1 Mechanický podklad - Základová deska

Jde o základní konstrukční komponentu na kterou se budou ostatní části nabalovat. Je závislá na výsledné aplikaci motoru. Největší podklady jsou dlouhé přes 100m. Motory s dlouhými posuvy disponují většinou konstrukčním usporádáním s permanentními magnety umístěnými na statoru.

### 2.3.2 Lineární vedení

Tato část zajišťuje přesnost a rychlosť posuvu. Je nutné tuto komponentu správně nadimenzovat. Jestliže tak neučiníme, ztrácíme přesnost posuvu a měřící systém nebude syntetizovat správné výsledky. Pro mechanické sestavení tohoto vedení je třeba využít speciální nástroje pro kalibraci lineárních motorů. Více o lineárních vedeních ve [4].



Obrázek 2.4: Lineární motor

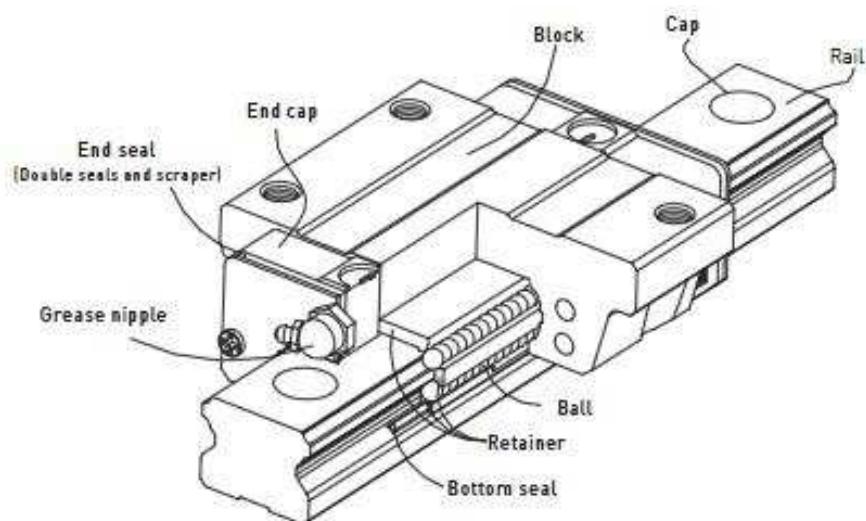
### 2.3.3 Měřící systém

Tento systém a hlavně jeho výsledná přesnost je opět závislý na výsledné aplikaci celého motoru. Pro měření se nejčastěji používají optické senzory, můžeme se ale také setkat se senzory magnetickými nebo indukčními. Nejpřesnější modely motorů využívají kombinovaný systém s optickými a magnetickými senzory.

Na obr. 2.6 je snímací hlavice integrována přímo ve vozíku lineárního vedení. Magnetický pásek je nalepen na kolejnici. Výstupní signál je v reálném čase.

### 2.3.4 Kabelové vedení

Kabelové vedení je přívodem napájení vinutí motoru, pro motory s vinutím umístěným na rotoru je kabelové vedení technicky nejnáročnějších část motoru, musí stačit pro celou délku posuvu, vydržet zrychlení posuvu, okolní podmínky a mělo by být časově co nejstabilnější.



Obrázek 2.5: Schéma lineárního vedení



Obrázek 2.6: Snímací hlavice

# Kapitola 3

## Využití motoru v praxi

### 3.1 Specifikace pro tlumení

Lineární elektrický motor použitý jako tlumič může být mnohem vhodnější než pneumatické nebo hydraulické tlumiče. Hlavním argumentem pro toto tvrzení je reakční čas tlumiče. Většina systémů s hydraulickým tlumením není schopna vykonat reakční zásah dříve než za 10 ms (standard okolo 15 ms). Nejrychlejší hydraulické systémy reagují zhruba za 7 ms, ale to jsou značně upravené systémy, které používají kapaliny obsahující kovové částice, které změní vlastnosti kapaliny při působení magnetu.

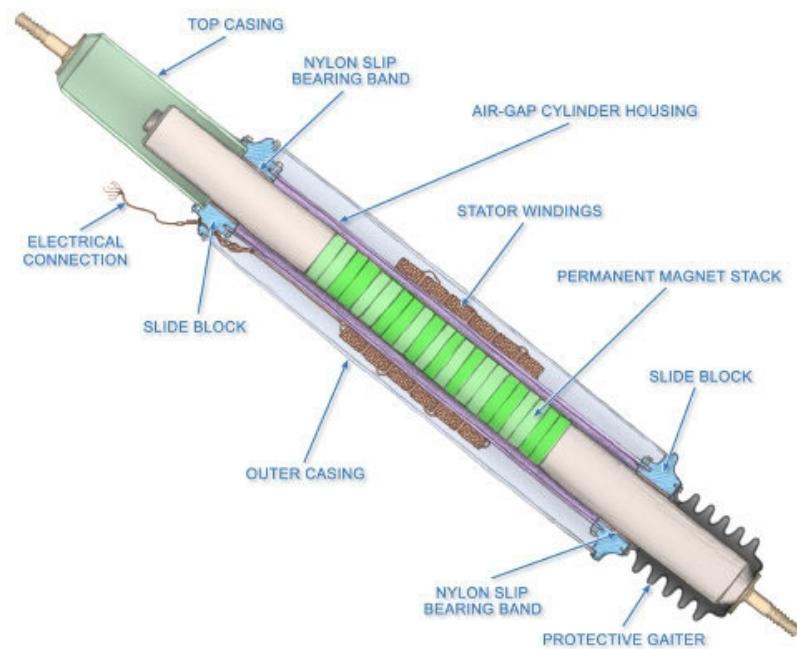
Lineární elektromotor je schopen tuto změnu vykonat pod 1 ms. V praxi to znamená, že při rychlosti  $72 \text{ km.h}^{-1}$  dokáže vozidlo vybavené těmito tlumiči změnit nastavení tlumičů za méně než 2 cm ujeté dráhy. Naproti tomu vozidlo vybavené konvenčním hydraulickým systémem s reakčním časem 15 ms dokáže měnit svoje nastavení každých 30 cm. Během téhoto 30 cm často vozidlo může celou nerovnost projet a celá reakce je tak zbytečná. V některých případech je však lepší, když vozidlo nerovnost přejede bez rychlého a silného akčního zásahu.

Tyto elektrické tlumiče však pracují v aktivních tlumících systémech. Nevýhodou tohoto systému je především jeho složitost a energetické nároky. Každý tlumič pracuje pod napětím zhruba 300 V. Dále musíme u tohoto akčního systému napájet celou řídící jednotku systému. Energetické nároky snižuje fakt, že tlumiče dokáží pracovat během jisté části tlumícího cyklu jako generátory a rekuperují tak zpět do systému elektrickou energii.

Pasivní tlumicí systém, který se v této práci pokouší navrhnout, nemá tak rychlé reakční doby jako dnes známé systémy aktivní. V tomto systému není třeba tlumič

takto napájet. Elektrický lineární motor v této specifikaci funguje při fázi rekuperace jako generátor, nemá žádnou řídící jednotku, kterou musíme u aktivních systémů také napájet. Jediný prvek co je třeba napájet je proudový zesilovač, který zesiluje řídící proud protékající motorem a umožňuje tak optimální nastavení tlumiče.

Na obrázku (obr. 3.1) je znázorněn lineární motor specifikovaný jako tlumič pro osobní vozidlo.



Obrázek 3.1: Lineární tlumič

## 3.2 Návrh využití

Konvenční pasivní systémy tlumení odpružení automobilů jsou obvykle tvořeny pružinou a kapalinovým tlumičem. Existují dvě základní výsledné charakteristiky, určené přesnou aplikací, podle kterých jsou tyto systémy nastaveny. Bud' pro jízdní vlastnosti nebo pro komfort jízdy. Toto nastavení ovlivňuje především tlumič, který je bud' "tvrdší" (vyšší hodnota konstanty tlumení) nebo "měkčí" (nižší hodnota konstanty tlumení). Měkčí nastavení vyhovuje spíše komfortu posádky a tvrdší nastavení bývá lepší pro jízdní vlastnosti. Pasivní tlumení proto musí být kompromisem mezi jízdními vlastnostmi a komfortem posádky.

Výrazně lepším řešením je systém poloaktivní. Ten umožňuje měnit nastavení konstanty tlumení. To je u klasických tlumičů provedeno řídícím ventilem, který ovlivňuje průchod kapaliny tlumičem a mění tak konstantu tlumení. U dražších tlumičů se toto provádí působením magnetického pole na kapalinu tlumiče, která obsahuje kovové částice, což mění vlastnosti kapaliny a tudíž i výslednou konstantu tlumení.

Návrh takového poloaktivního systému vycházející z pasivního systému s lineárním motorem nebyl příliš složitý. Jediné co bychom museli nastavovat by byla konstanta zesílení proudu. Tato konstanta mění tok proudu motorem, čímž mění konstantu tlumení motoru. To způsobuje změnu chování celého systému (viz. kapitola 4). Tímto nastavením tedy můžeme snadno volit mezi nastavením pro komfort cestujících a nastavením pro lepší jízdní vlastnosti.

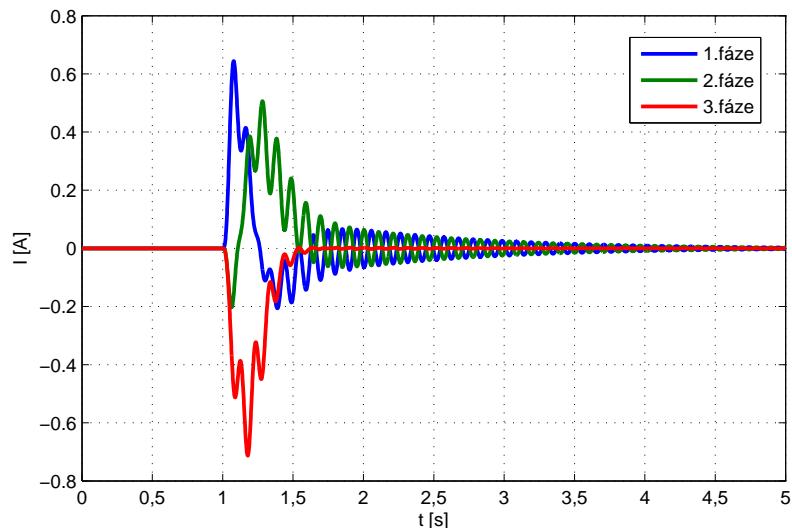
# Kapitola 4

## Řízení proudu motoru

### 4.1 Řídící proud

Lineární motor použitý jako základ pro matematický model v této práci je trojfázový asynchronní stroj, tudíž k jeho řízení potřebuji tři průběhy proudu vzájemně fázově posunuté o  $120^\circ$  ( $2/3 \pi$  rad).

Hodnotu tohoto proudu stanovuji jednotlivě pro každou fázi motoru v závislosti na aktuální poloze rotoru a aktuální rychlosti jeho pohybu. Tím vytvořím základ pro akční zásah motoru.



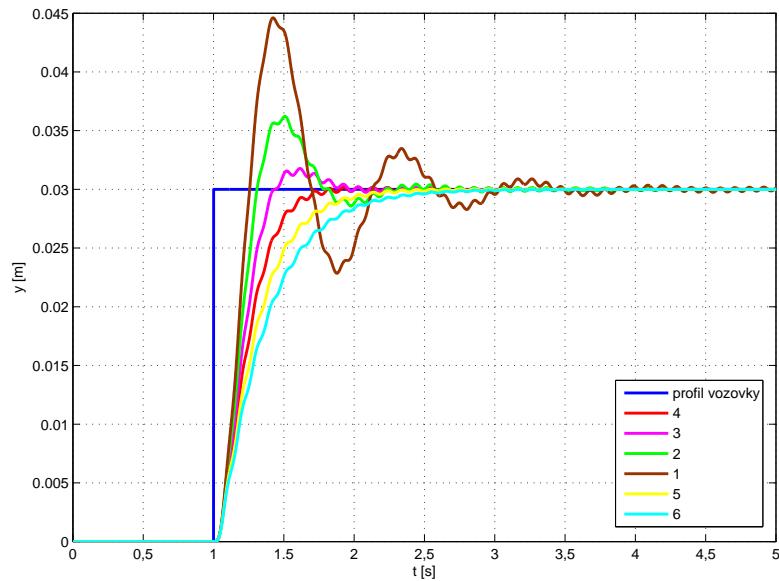
Obrázek 4.1: Průběh proudů

Obr. 4.1. ukazuje průběh proudů jednotlivých fází motoru, před zesílením, pro vstupní signál skok (velikost 3cm, čas 1s). Pro nastavení parametrů tlumení tohoto motoru ještě použiji proudový zesilovač, který v tomto případě pracuje jako proporcionalní regulátor a pro tuto aplikaci motoru plně postačuje.

Maximální proud, který může do motoru vstupovat je 21,8A. Proto jsem, z bezpečnostních důvodů, výstup proudového zesilovače v modelu omezil na maximální hodnotu 20A. Model však nevykazoval ani při šestinásobném zesílení tak velký proud, tudíž je toto proudové omezení pouze formální.

## 4.2 Simulace pro různé řídící proudy

Pro simulace změny vlastností tlumení motoru na řídícím proudu, jsem se rozhodl použít nastavení proporcionalního zesilovače na hodnoty 1, 2, 3, 4, 5 a 6. Toto rozpětí pokrývá změnu vlastností motoru takovou, že celkové chování systému přechází od nedotlumeného (*nastaveno na 1*) až po mírně přetlumené (*nastaveno na 6*).



Obrázek 4.2: Celková odezva systému

Obr. 4.2. ukazuje chování systému pro různé nastavení zesílení řídícího proudu.

Tab. 4.1. ukazuje hodnoty ustálení, překmit a maximální tlumení, které motor vyvinul pro různě hodnoty zesílení řídícího proudu.

Tabulka 4.1: Odezvy systému

hodnota zesílení	tlumení [N.s.m <sup>-1</sup> ]	ustálení (10pr) [s]	ustálení (5pr) [s]	překmit [proc]	překmit [mm]
1	304	1,37	1,82	50	15
2	461	0,65	0,98	21	6,2
3	546	0,36	0,65	6	1,8
4	604	0,48	0,58	0	0
5	685	0,62	0,80	0	0
6	751	0,80	1,02	0	0

Podle Obr. 4.2. - *Celková odezva systému* a Tab. 4.1. - *Odezvy systému* jsem se rozhodl použít jako základ pro další simulace hodnotu zesílení 4. Spolu s hodnotou zesílení 3 jsou nejrychlejší, ale hodnota 4 má nulový překmit, což pro mne byl v tomto případě rozhodující parametr. Odezvy pro nastavení 5 a 6 již považuji za přetlumené a stejně tak hodnoty nastavení 1 a 2 zesilovače za nedotlumené.

Toto nastavení určuje celkové chování výsledného systému. Při praktické realizaci tohoto systému by se toto nastavení dalo velmi snadno měnit. Tím bychom ze systému pasivního vytvořili systém poloaktivní. Poloaktivní systém tlumení odpružení nabízí mnohem lepší výsledné jízdní vlastnosti i komfort posádky, jelikož tento systém můžeme podle potřeby nastavovat a tím tlumení zvýšit (jízdní vlastnosti) či snížit (komfort posádky).

# Kapitola 5

## Simulace chování

### 5.1 Model

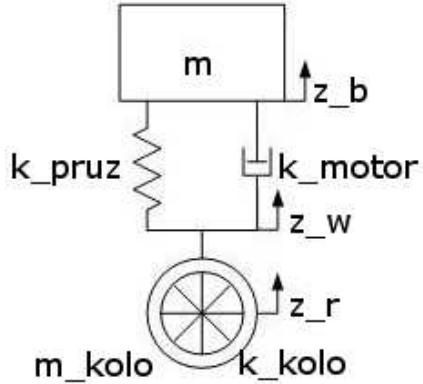
#### 5.1.1 Model systému

V této části navrhoji model čtvrtiny automobilu. Čtvrtinový model tlumení automobilu je základní model, který stanovuje chování celého vozidla, tudíž na něm můžeme simulovat vlastnosti celého systému s použitím lineárního elektrického motoru použitého místo konvenčního kapalinového tlumiče. Můj model pracuje s hmotností kola, tuhostí pneumatiky, hmotností čtvrtiny vozidla, pružinou a lineárním motorem použitým jakožto tlumič. Matematický model vytvářím sestavením rovnic pro síly působící na model, které dále převádí na diferenciální pohybové rovnice.

Tabulka 5.1: Význam symbolů použitých u schématu modelu

$m$	hmotnost čtvrtiny vozidla	$250\text{kg}$
$m_{kolo}$	hmotnost kola	$35\text{kg}$
$z_r$	profil vozovky	$m$
$z_w$	poloha kola - vztaženo k vozovce	$m$
$z_b$	poloha karoserie - vztaženo k poloze kola	$m$
$k_{kolo}$	konstanta tuhosti pneumatiky	$115\text{kN.m}^{-1}$
$k_{pruz}$	konstanta tuhosti pružiny	$15\text{kN.m}^{-1}$
$k_{motor}$	konstanta tlumení lineárního motoru	$\text{N.s.m}^{-1}$

### 5.1.2 Diferenciální pohybové rovnice



Obrázek 5.1: čtvrtinový model odpružení automobilu

#### Silové rovnice

$$\begin{aligned} m\ddot{z}_b &= -k_{pruz}(z_b - z_w) - k_{motor}(\dot{z}_b - \dot{z}_w) \\ m_{kolo}\ddot{z}_w &= k_{pruz}(z_w - z_r) + k_{motor}(\dot{z}_b - \dot{z}_w) - k_{kolo}(z_w - z_r) \end{aligned} \quad (5.1)$$

#### Pohybové rovnice

$$\begin{aligned} \ddot{z}_b &= -\frac{k_{pruz}}{m}(z_b - z_w) - \frac{k_{motor}}{m}(\dot{z}_b - \dot{z}_w) \\ \ddot{z}_w &= \frac{k_{pruz}}{m_{kolo}}(z_w - z_r) + \frac{k_{pruz}}{m_{kolo}}(\dot{z}_b - \dot{z}_w) - \frac{k_{kolo}}{m_{kolo}}(z_w - z_r) \end{aligned} \quad (5.2)$$

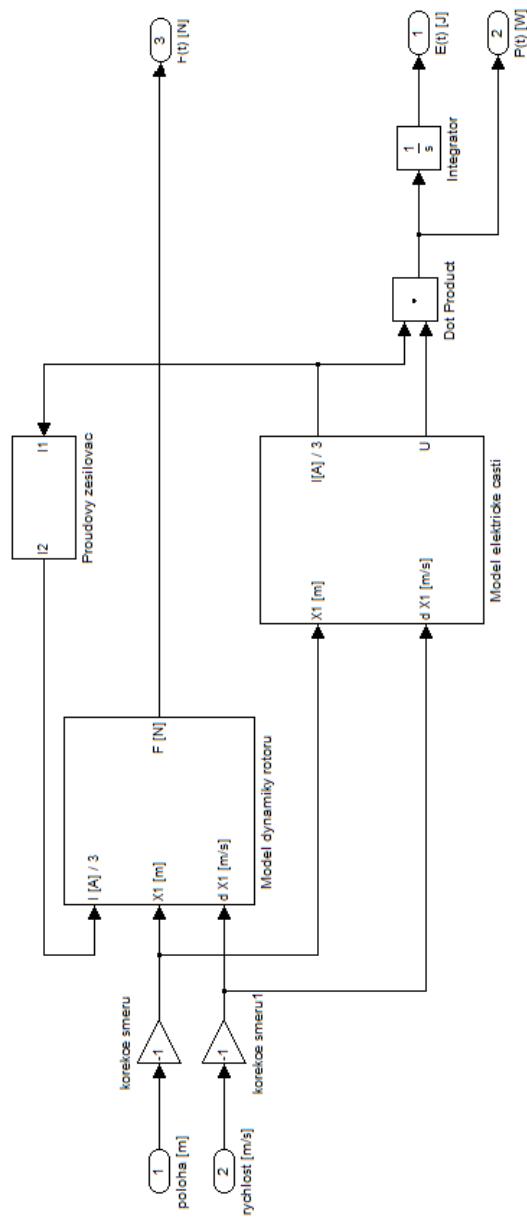
Z těchto rovnic jsem vytvořil model v prostředí simulink. Konstanta  $k_{motor}$  násobená rozdílem rychlostí  $\dot{z}_b - \dot{z}_w$  má fyzikální rozměr síly a její hodnota je rovna hodnotě síly vyvozené motorem. Tuto sílu pak vydělíme  $m$ , případně  $m_{kolo}$ , a získáme tím část celkového zrychlení  $\ddot{z}_b$ , případně  $\ddot{z}_w$ , vyvozenou lineárním motorem.

### 5.1.3 Model motoru

Jako základ pro vytvoření modelu motoru jsem použil simulinkové schéma z [2]. Z těchto schémat jsem použil bloky *Model dynamiky rotoru* a *Model elektrické části* a

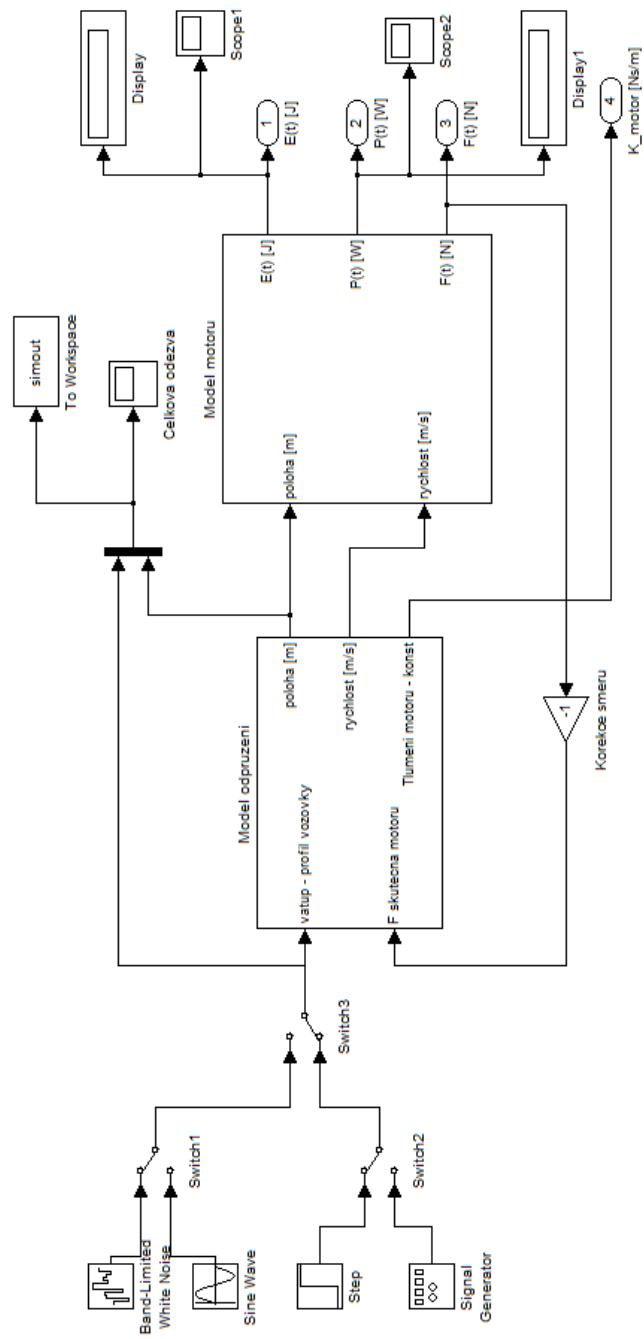
upravil je pro potřeby mého projektu.

Motor v tomto režimu pracuje jako generátor, pohyb rotoru indukuje magnetický indukční tok, který působí nadále jakožto magnetický odpor, který převeden na mechanické působení vyvolává výslednou sílu motoru. Pohyb rotoru tedy vytváří elektrický proud (Více o toku proudu motorem v kapitole 4 - *Rízení proudu motorem*).



Obrázek 5.2: Model motoru

### 5.1.4 Výsledný model systému



Obrázek 5.3: Model systému

## 5.2 Simulace

### 5.2.1 Úvod

Cílem této části práce je simuloval chování modelu (*MainX.mdl*), zjistit tak odezvu systému na vstupní signál a zaznamenat kolik tento systém dokáže rekuperovat energie. Dále můžeme sledovat průběhy proudů a napětí motoru, reakční síly motory, konstantu tlumení motoru a provést srovnání celkové odezvy systému se systémem s konvenčním kapalinovým tlumičem. Všechny konstanty tlumiče jsou uloženy v M-filu *data.m*.

Rozhodl jsem se simuloval pro vstupní signály skok, sinus, obdlník, pila a náhodný signál. Všechny modely systému použité v této sekci jsou na přiloženém CD (adresář *Simulink*).

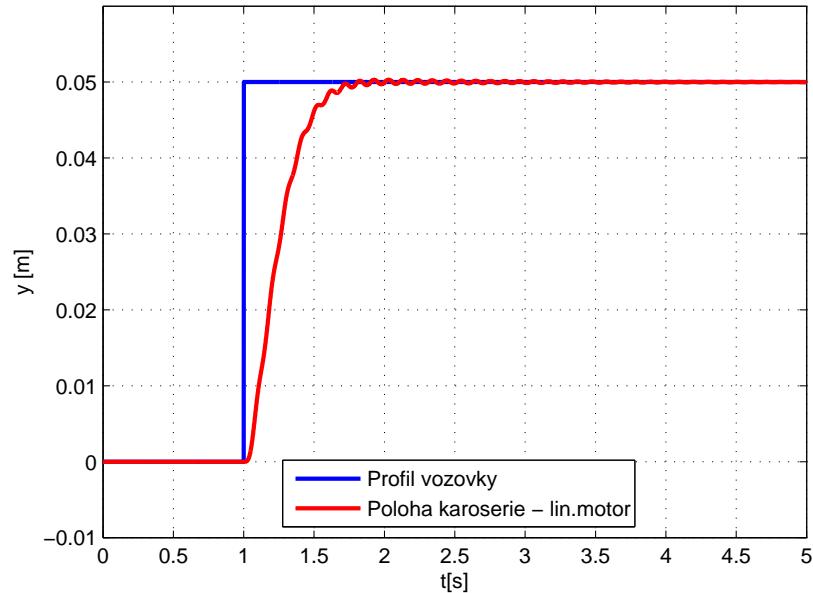
### 5.2.2 Vlastnosti simulací

Vstupní signál skok jsem simuloval skok nahoru i skok dolů, vždy o velikosti nerovnosti 5 cm, sinus, obdlník a pilu o frekvenci 0,25 Hz, 0,5 Hz a 1 Hz, všechny o amplitudě 5 cm a náhodný signál na sampling time 0,5 s a max amplitudu 5 cm.

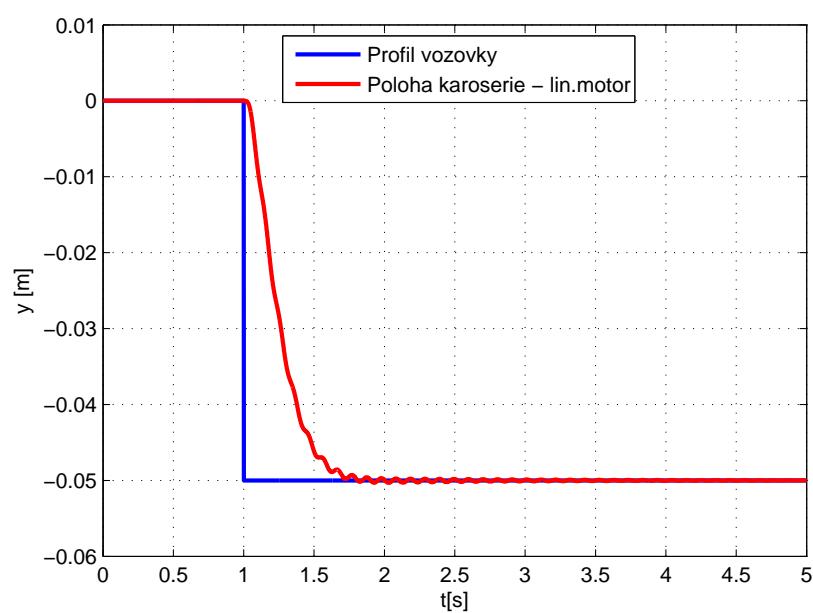
Všechny simulace jsem simuloval 5 s, u systému s lineárním motorem byla doba ustálení okolo 1 s, u systému s konvenčním tlumičem to bylo 1,5 - 2,5 s.

Simulace odezvy a zjišťování hodnot rekuperace energie jsem prováděl na modelu - *Model systému* (obr. 5.3), srovnání odezvy modelu s lineárním motorem a konvenčním systémem jsem prováděl podle modelu - *Model systému-srovnání* [příloha A].

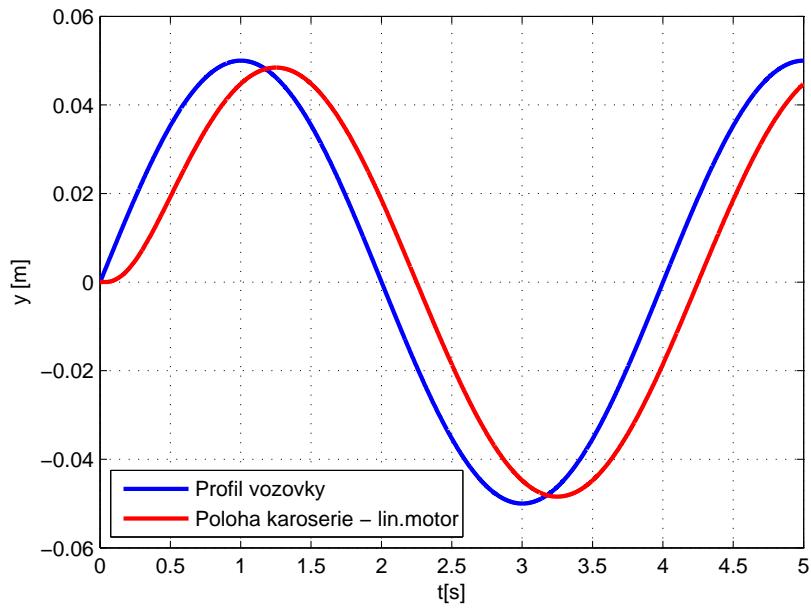
### 5.2.3 Celková odezva systému



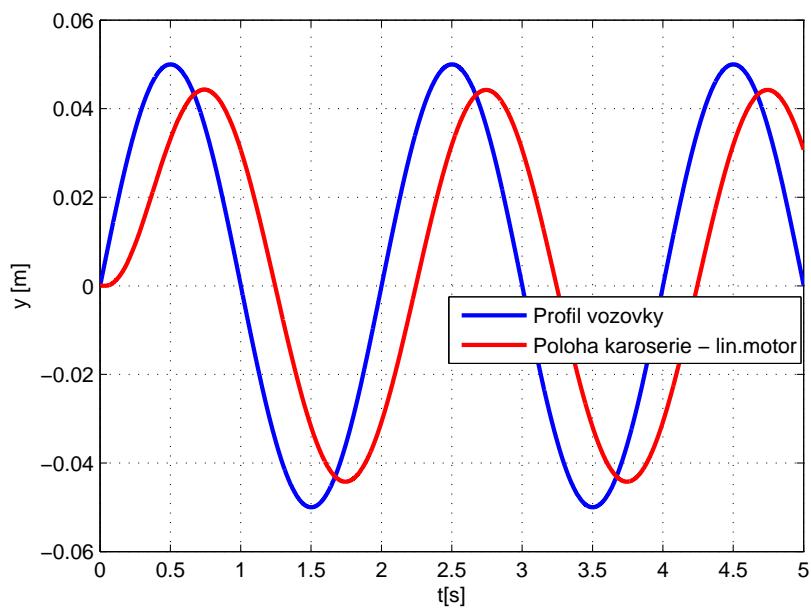
Obrázek 5.4: Odezva systému na skok



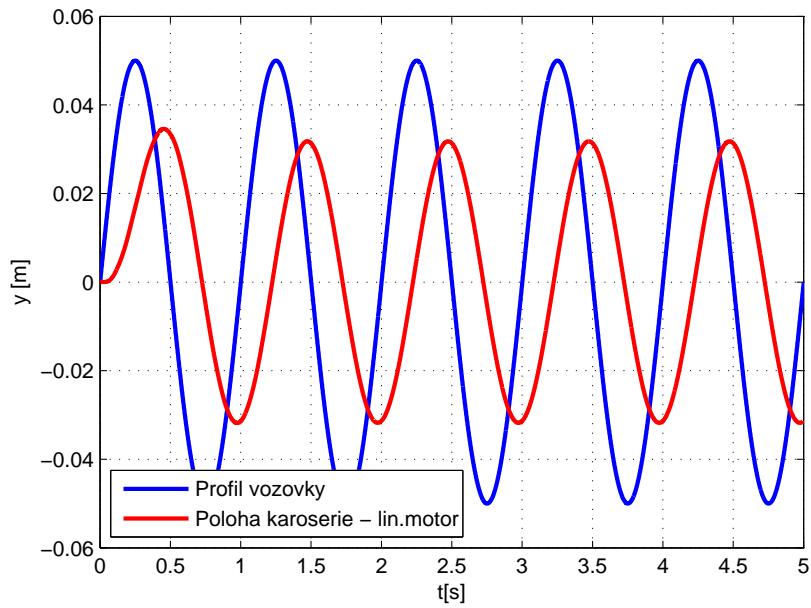
Obrázek 5.5: Odezva systému na skok



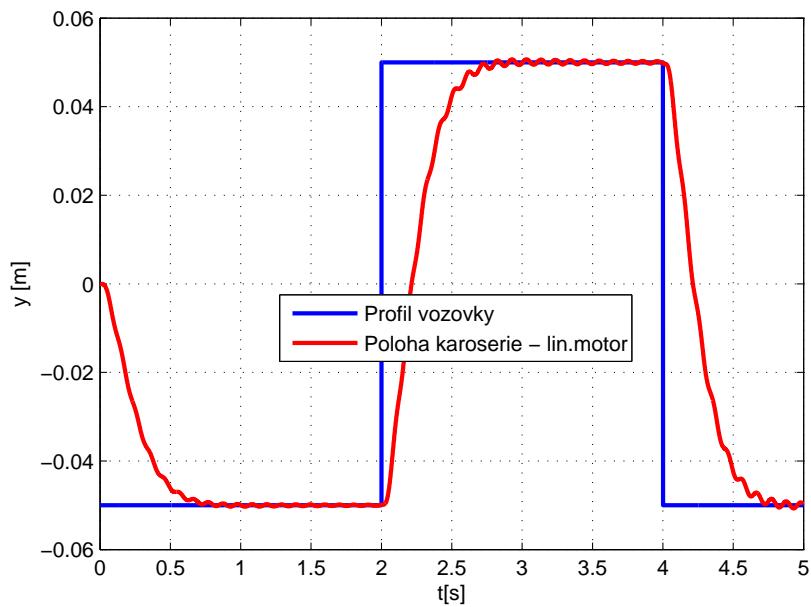
Obrázek 5.6: Odezva systému na Sinus,  $f = 0,25$  Hz



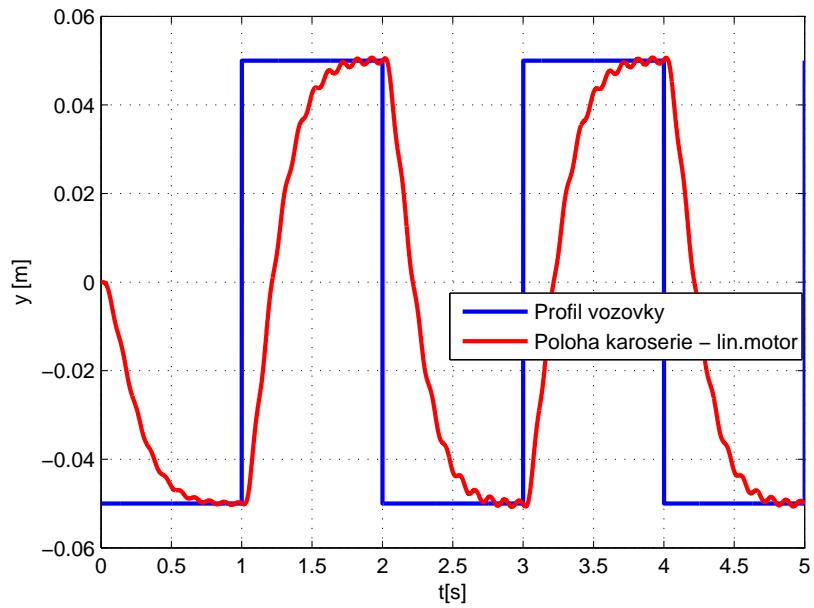
Obrázek 5.7: Odezva systému na Sinus,  $f = 0,5$  Hz



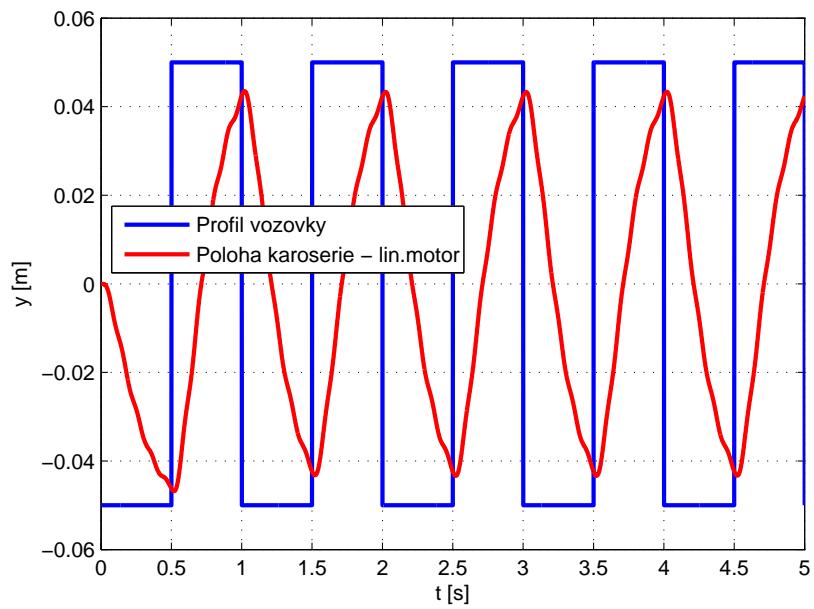
Obrázek 5.8: Odezva systému na Sinus,  $f = 1$  Hz



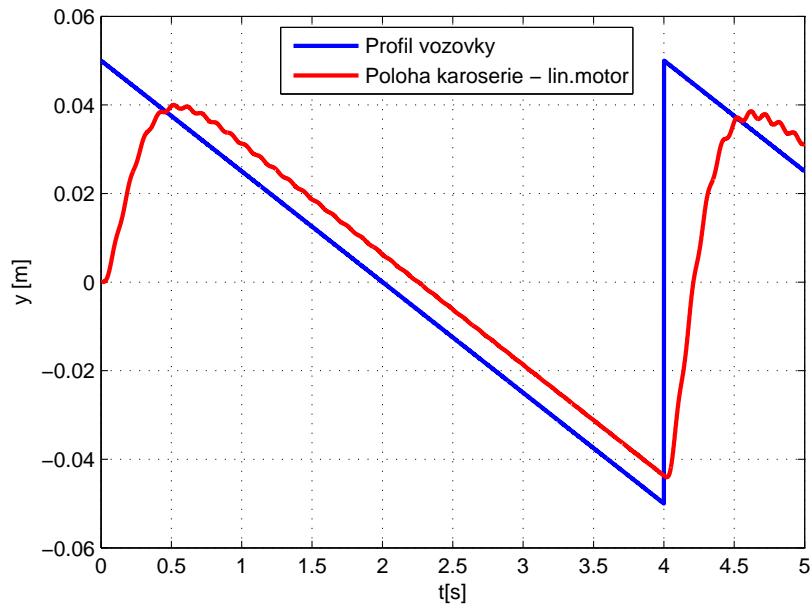
Obrázek 5.9: Odezva systému na Obdlník,  $f = 0,25$  Hz



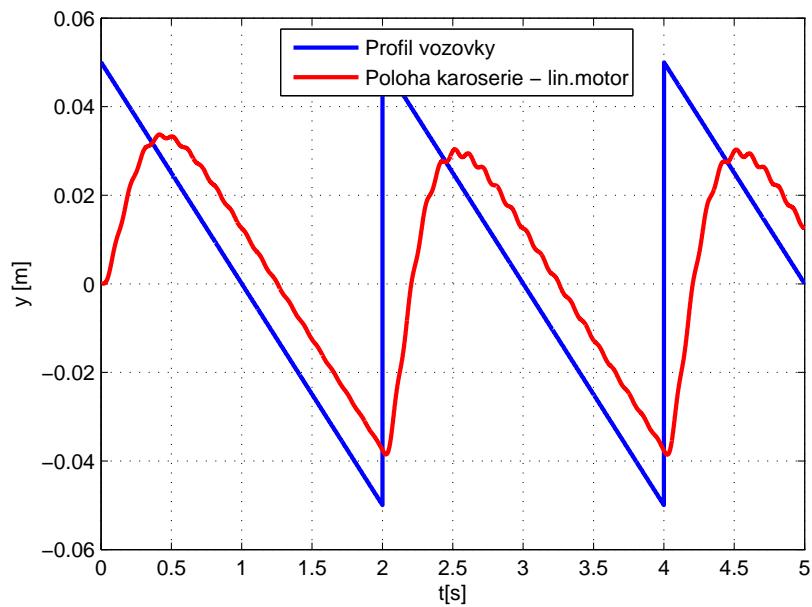
Obrázek 5.10: Odezva systému na Obdělník,  $f = 0,5$  Hz



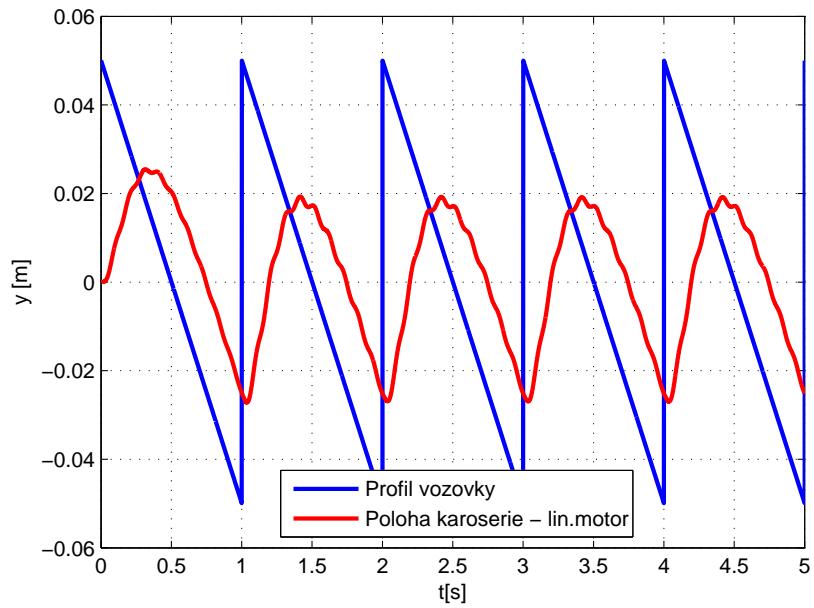
Obrázek 5.11: Odezva systému na Obdělník,  $f = 1$  Hz



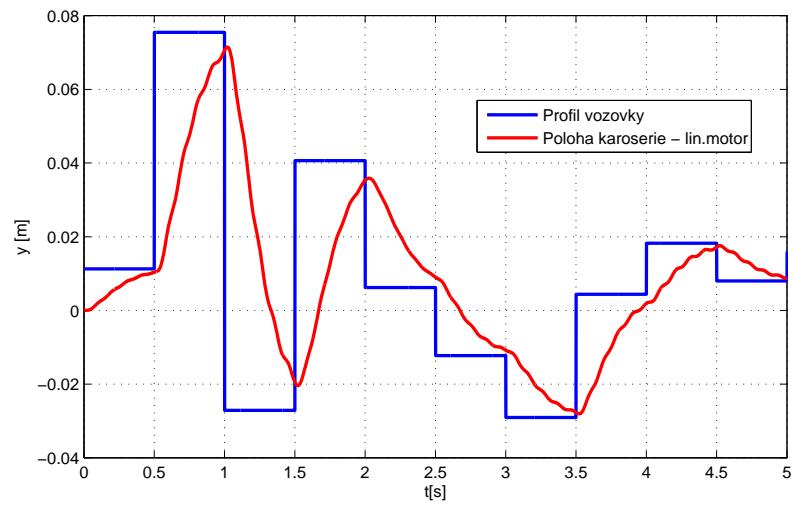
Obrázek 5.12: Odezva systému na Pilu,  $f = 0,25$  Hz



Obrázek 5.13: Odezva systému na Pilu,  $f = 0,5$  Hz



Obrázek 5.14: Odezva systému na Pilu,  $f = 1$  Hz



Obrázek 5.15: Odezva systému na náhodný signál

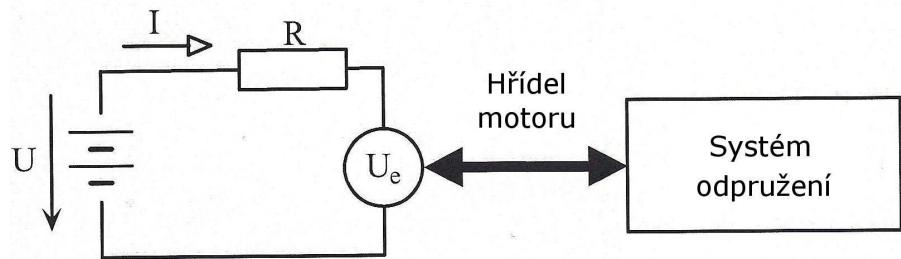
Tabulka 5.2: Seznam simulací

Číslo obrázku	Profil vozovky/vstupní signál	Amplituda [cm]	Frekvence [Hz]
5.4	Skok nahoru	5	-
5.5	Skok dolů	5	-
5.6	Sinus	5	0,25
5.7	Sinus	5	0,5
5.8	Sinus	5	1
5.9	Obdelník	5	0,25
5.10	Obdelník	5	0,5
5.11	Obdelník	5	1
5.12	Pila	5	0,25
5.13	Pila	5	0,5
5.14	Pila	5	1
5.15	Náhodný signál	3	-

## 5.3 Rekuperace energie

### 5.3.1 Podmínky pro přeměnu mechanické energie na elektrickou

Pro jednodušší pochopení tohoto problému vysvětlím princip zpětného získání energie na jednodušším systému se synchronním motorem (obr. 5.16).



Obrázek 5.16: Schéma systému se synchronním motorem

Hřídel motoru (rotor) je pevně spjata s mechanickou soustavou. Rotor se pohybuje vzhledem k statoru rychlostí  $v > 0$ . Pohyb rotoru s permanentními magnety vyvolá na vinutí statoru elektromotorické napětí  $U_e$ . Hodnota napětí  $U_e$  je lineární úměrná rychlosti pohybu rotoru  $v$ . Platí

$$\begin{aligned} P_m &= P_e \\ P_m &= F \cdot v \\ P_e &= U_e \cdot I \end{aligned} \tag{5.3}$$

$F$  je síla vyvozená elektrickým motorem,  $I$  je proud protékající vinutím motoru, napětí  $U_e$  uvažujeme kladné. Jestliže platí:

$$F \neq 0 \Rightarrow P_m > 0 \Leftrightarrow P_e > 0 \Rightarrow I \neq 0 \tag{5.4}$$

pak motor pracuje jako pohon. Elektromotorické napětí  $U_e$  je menší než napětí zdroje  $U$ , zdroj dodává do elektrického obvodu větší napětí než jaké vyžaduje mechanická soustava, tudíž vytváří větší sílu než je síla vytvářená na hřídel motoru mechanickou soustavou odpružení. Energii do obvodu dodáváme.

Abychom mohli ze systému energii zpětně odebírat, tak potřebujeme, aby elektromotorické napětí  $U_e$  bylo větší než napětí dodávané zdrojem  $U$  a větší než 0 ( $0 < U < U_e$ ). Za těchto podmínek motor funguje jako brzda pro soustavu odpružení. Jestliže potřebujeme, aby motor brzdil větší silou, musíme do obvodu dodávat napětí zdroje  $U < 0$ . Nesmíme tedy chtít, aby motor brzdil moc silně, jestliže chceme rekuperovat energii.

Uskladňováním energie se v této práci nezabývám. Více o rekuperaci a uskladňování energie v [2].

### 5.3.2 Hodnoty narekuperované energie

Po odeznění celého děje jsem z grafu průběhu výkonu odečetl maximální hodnotu výkonu (dodaný do motoru proudovým zesilovačem). Průběh výkonu byl během celého děje záporný, což znamená, že motor dodával do obvodu energii, jelikož jsme brzdili "rozumnou" silou. Do tabulky jsem zaznamenal hodnotu energie dodanou motorem, proto jsem si zapisoval kladnou. Stejně tak jsem zjistil hodnotu energie získanou během procesu, kterou jsem odečetl z bloku *Display*.

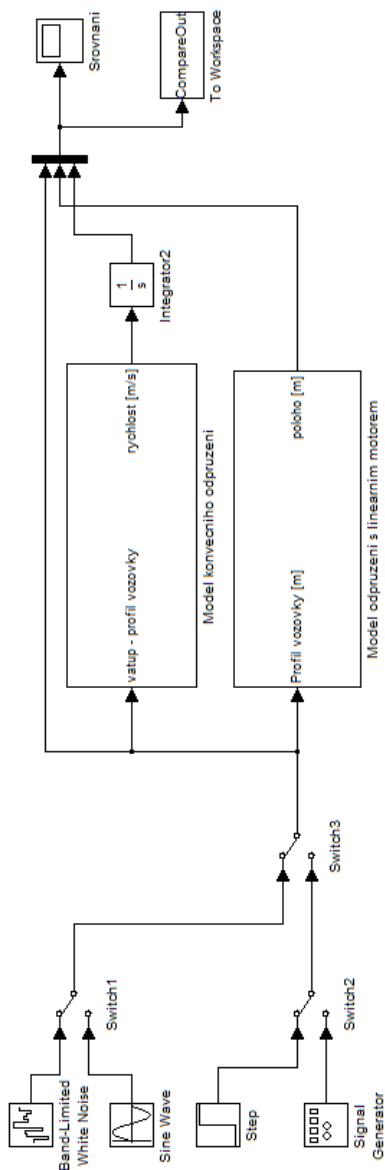
Do tabulky (tab. 5.3 - *Hodnoty rekuperace*) jsem zaznamenal hodnoty energie narekuperované motorem během simulace. Délka každé simulace byla 5s. Dále jsem také zaznamenal hodnotu největšího elektrického výkonu motoru při každé simulaci.

Tabulka 5.3: Hodnoty rekuperace

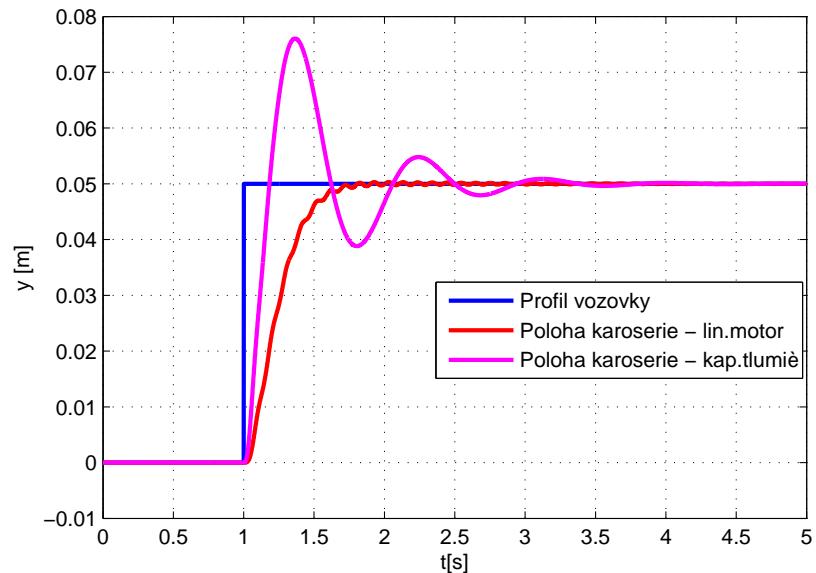
Vstupní signál	Amplituda [cm]	Frekvence [Hz]	Max. výkon [W]	Energie [J]
Skok nahoru	5	-	34	24
Skok nahoru	3	-	12	8
Skok dolů	5	-	34	24
Skok dolů	3	-	12	8
Sinus	5	0,25	6	60
Sinus	3	0,25	2	20
Sinus	5	0,5	21	184
Sinus	3	0,5	17	64
Sinus	5	1	43	400
Sinus	3	1	16	144
Obdelník	5	0,25	139	220
Obdelník	3	0,25	51	80
Obdelník	5	0,5	150	420
Obdelník	3	0,5	54	152
Obdelník	5	1	123	728
Obdelník	3	1	45	264
Pila	5	0,25	117	108
Pila	3	0,25	42	40
Pila	5	0,5	98	168
Pila	3	0,5	35	60
Pila	5	1	67	236
Pila	3	1	24	84

## 5.4 Srovnání s konvenčním systémem

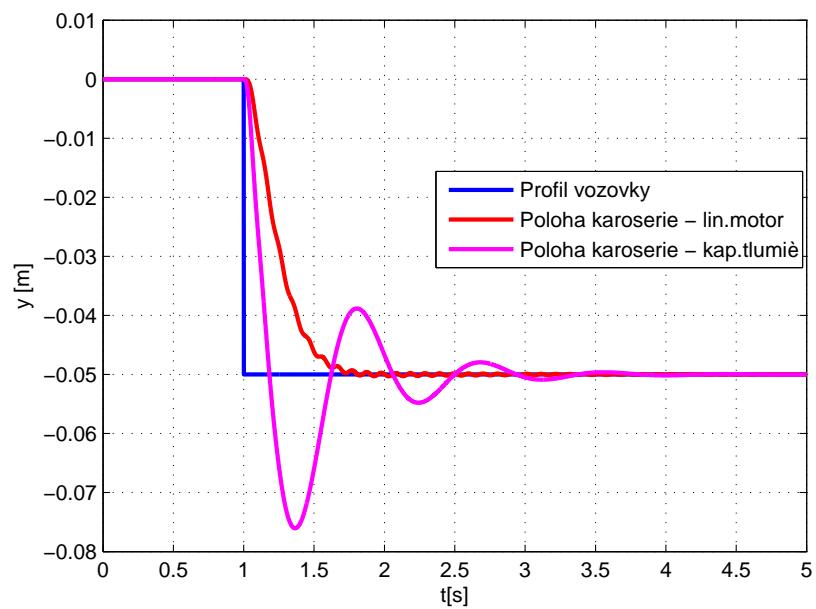
Pro srovnání s konvenčním systémem s kapalinovým systémem jsem vytvořil nový simulinkový model (*MainSrovnání.mdl*). Konstantu kapalinového tlumiče jsem zvolil  $1200\text{N.s.m}^{-1}$ . Tuto konstantu můžeme změnit v M-fili *data.m* přiloženému k modelu simulace.



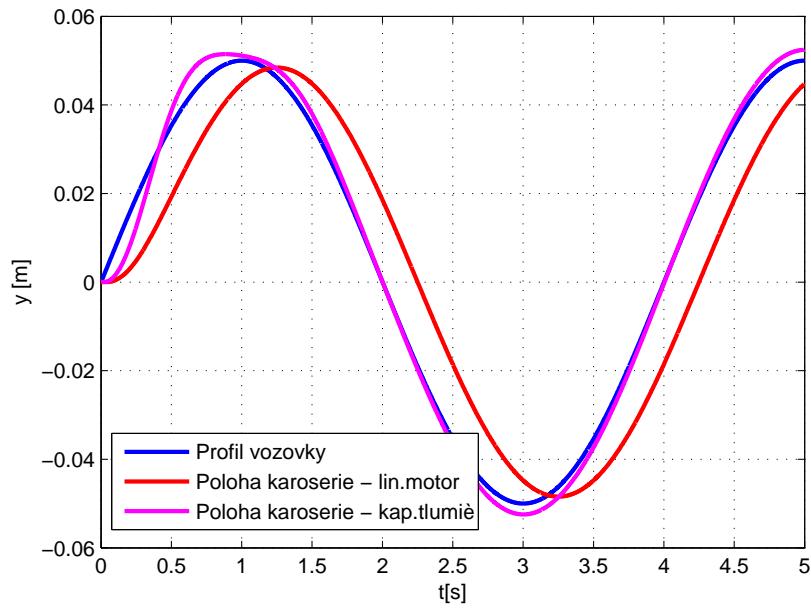
Obrázek 5.17: Model pro srovnání systémů



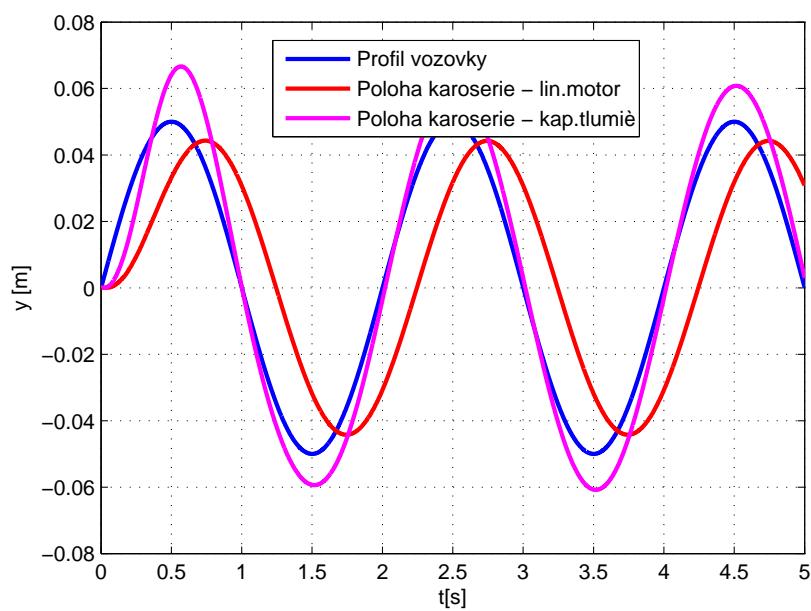
Obrázek 5.18: Srovnání - Skok nahoru



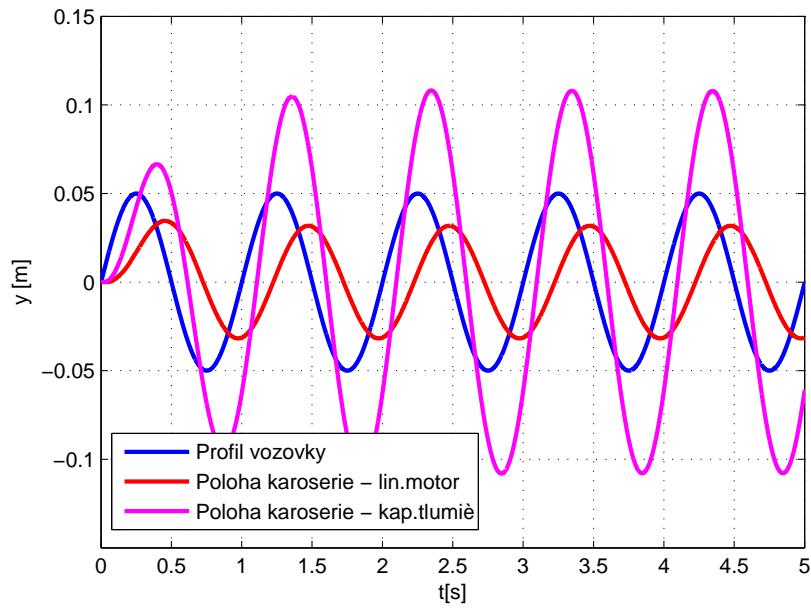
Obrázek 5.19: Srovnání - Skok dolů



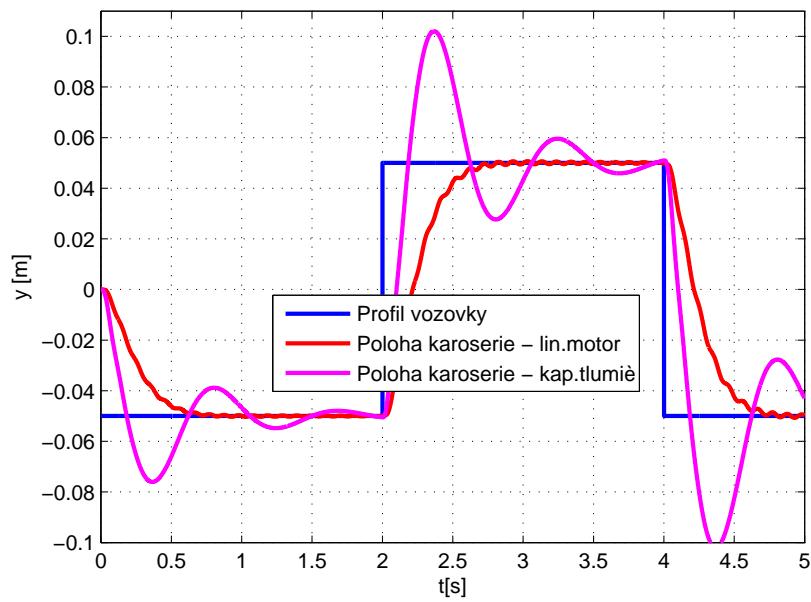
Obrázek 5.20: Srovnání - Sinus,  $f = 0,25\text{Hz}$



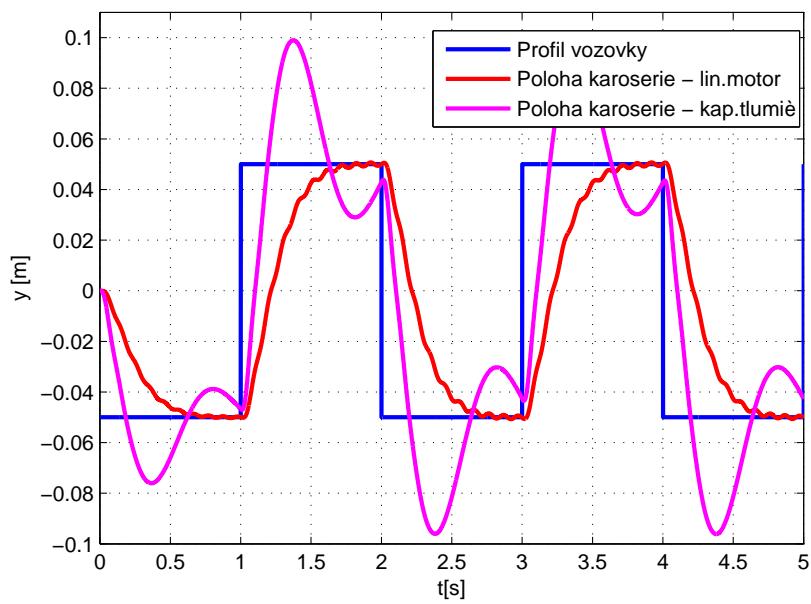
Obrázek 5.21: Srovnání - Sinus,  $f = 0,5\text{Hz}$



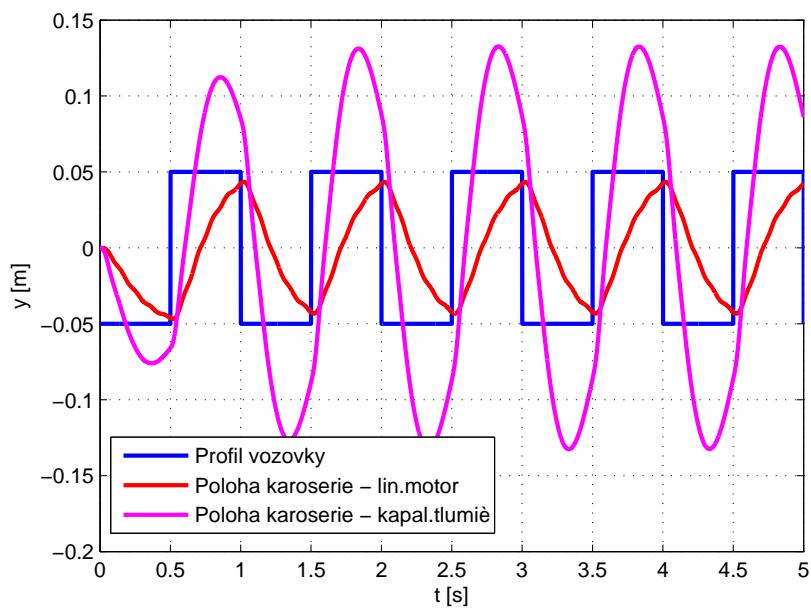
Obrázek 5.22: Srovnání - Sinus,  $f = 1\text{Hz}$



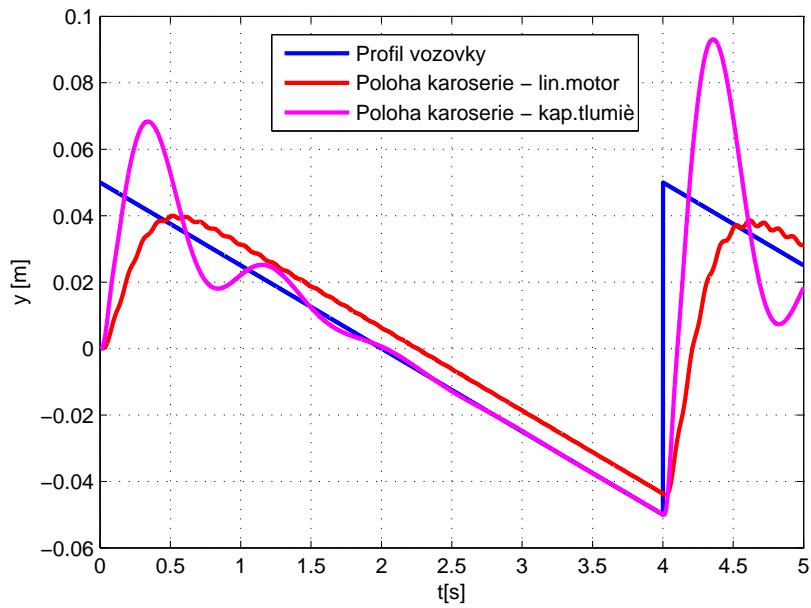
Obrázek 5.23: Srovnání - Obdélník,  $f = 0,25\text{Hz}$



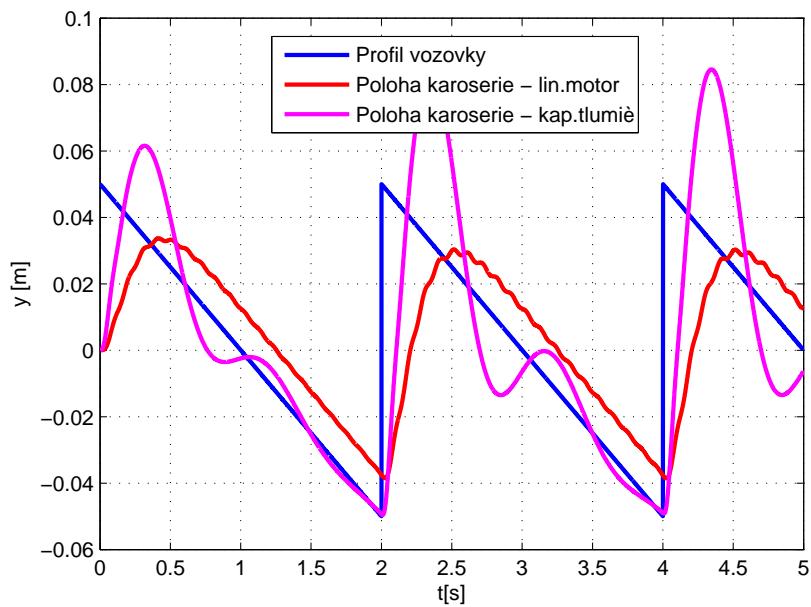
Obrázek 5.24: Srovnání - Obdělník,  $f = 0,5\text{Hz}$



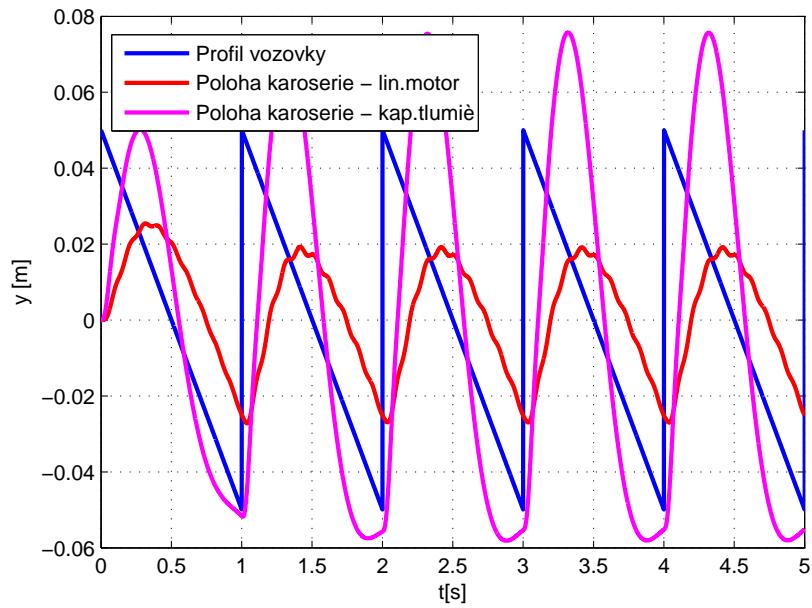
Obrázek 5.25: Srovnání - Obdělník,  $f = 1\text{Hz}$



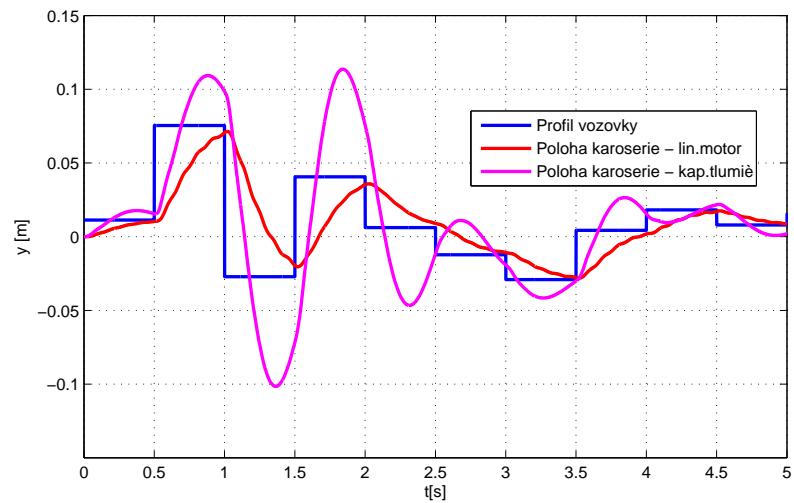
Obrázek 5.26: Srovnání - Pila,  $f = 0,25\text{Hz}$



Obrázek 5.27: Srovnání - Pila,  $f = 0,5\text{Hz}$



Obrázek 5.28: Srovnání - Pila,  $f = 1\text{Hz}$



Obrázek 5.29: Srovnání - náhodný signál

# Kapitola 6

## Závěr

Ve své práci jsem vytvořil kompletní čtvrtinový model tlumení odpružení automobilu za použití lineárního motoru jakožto tlumiče a stanovil předpokládané množství energie, kterou bychom z tohoto systému mohli zpětně získat.

Seznámil jsem se s lineárním elektrickým motorem, jeho fyzikálním principem a základy konstrukce takového motoru. Dále jsem se pokusil zhodnotit využití systému v praxi a navrhl základ tohoto řešení, jakožto poloaktivního systému, využívajícího změny nastavení proudového zesilovače.

V části řízení toku proudu motorem jsem stanovil nastavení proudového zesilovače pro různé nastavení chování výsledného systému, tak aby se tento systém mohl modifikovat podle výsledné aplikace.

Nejsložitější částí mojí práce byl návrh modelu pro simulaci, jelikož jsem vycházel ze systémů s aktivními akčními prvky. Tyto návrhy jsem několikrát konzultoval s vedoucím práce. Kompletní návrhy, kontroly a simulace jsem prováděl v prostředí Matlab Simulink.

# Literatura

- [1] Souček P., Bubák A., *Vysoko dynamické pohony posuvů obráběcích strojů*  
Společnost pro obráběcí stroje, Praha, 2002
- [2] Znamenáček K., *Lineární motor jako akční člen aktivního tlumiče*  
Praha, 2004
- [3] Kruczak A., *Řízení aktivního tlumení pérování automobilů*  
Praha, 2003
- [4] Hiwin Linear Technology, *Článek o lineárních motorech*  
[<http://www.hiwin.cz/pdf>](http://www.hiwin.cz/pdf)
- [5] Fanuc GE, *Drive systems*  
[<http://www.gefanuc.cz>](http://www.gefanuc.cz)

## Programové vybavení

*MATLAB r2008b ver. 7.7*, Mathworks, MATLAB © 2008  
*Simulink toolbox ver. 7.2*, MAthworks, MATLAB © 2007

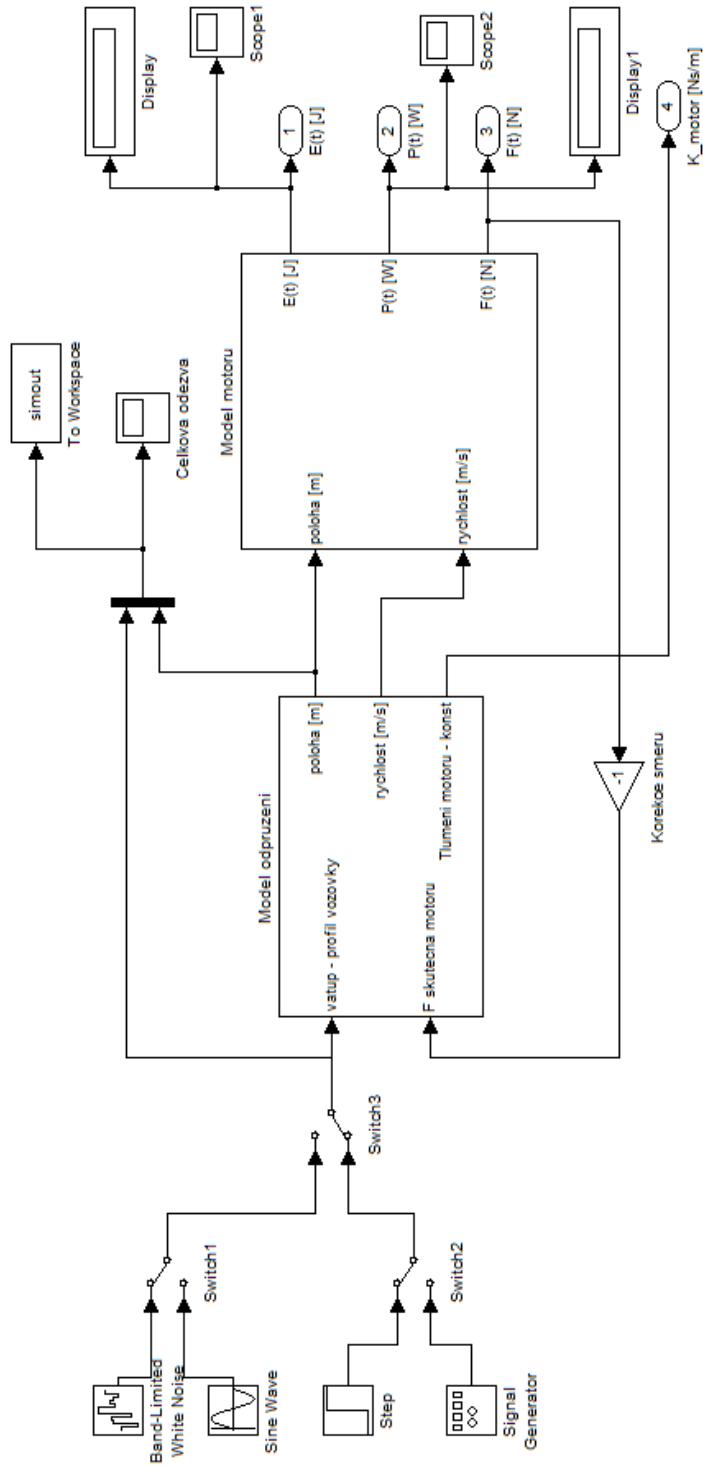
## **Příloha A**

### **Model systému**

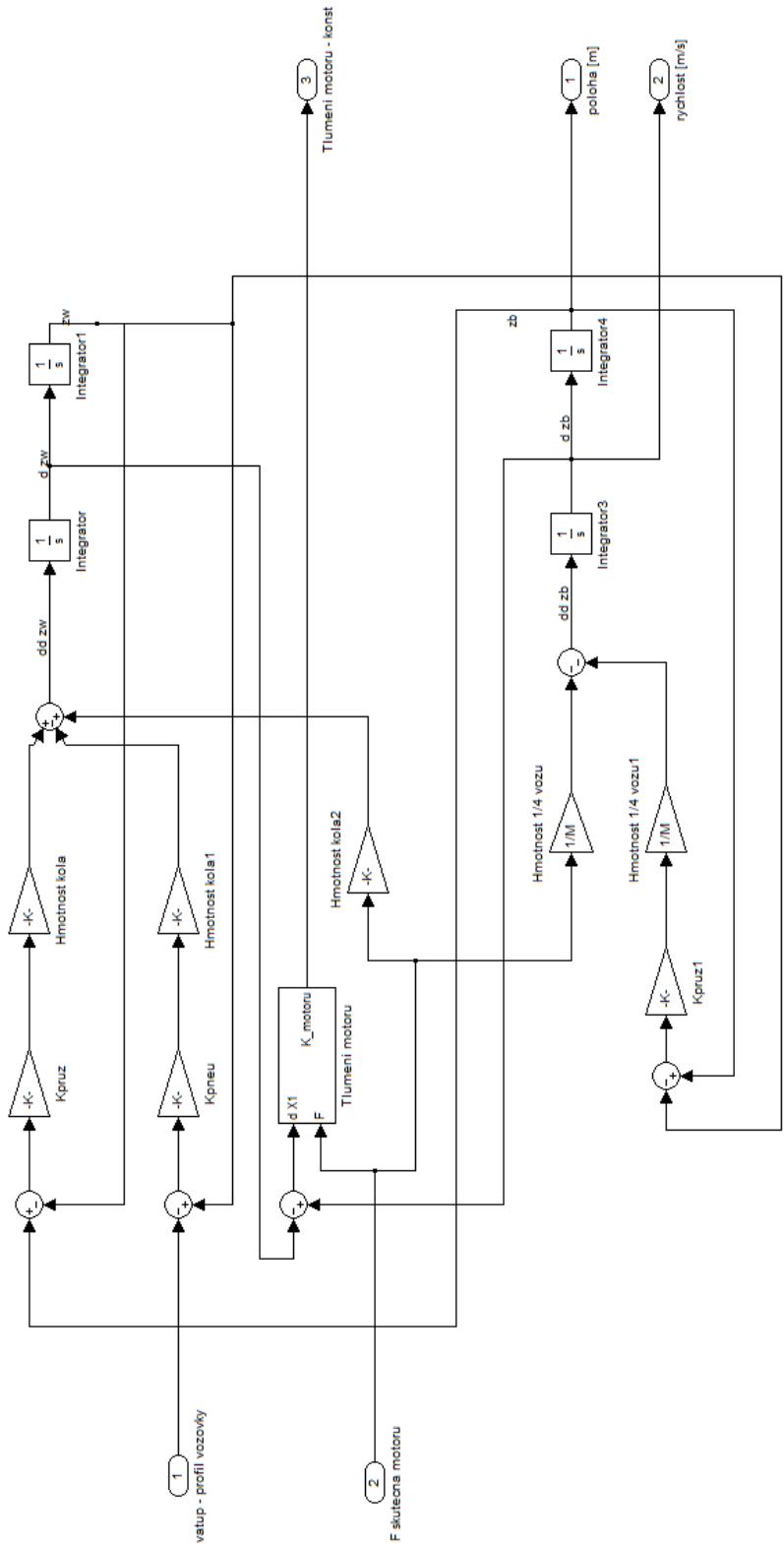
## A.1 M-file *data.m*

```
L_k1=107; %[V.s/m] napěťová konstanta  
L_m=6; %[kg] hmotnost rotoru  
L_Fc=1; %[N] coulombova třecí síla  
L_bv=10; %[N.s/m] viskózní třecí síla  
L_k2=93; %[N/A] silová konstanta motoru  
L_s0=0.0712/2; %[m] délka elektrického cyklu  
L_Rs=16; %[ohm] odpor vinutí  
L_Ls=0.0213; %[H] indukčnost vinutí  
L_fi=[0 2*pi/3 -2*pi/3]; %[rad] vzájemný posun fází  
M=250; %[kg] hmotnost 1/4 vozu  
K_pneu=115000; %[N/m] tuhost pneumatiky  
K_pruz=15000; %[N/m] tuhost pruziny  
K_tlumic=1200; %[Ns/m] tlumenni konvenčního tlumice  
M_kolo=35; %hmotnost neodpružené části kola  
X_proud=4; %nastavení proudového zesilovače
```

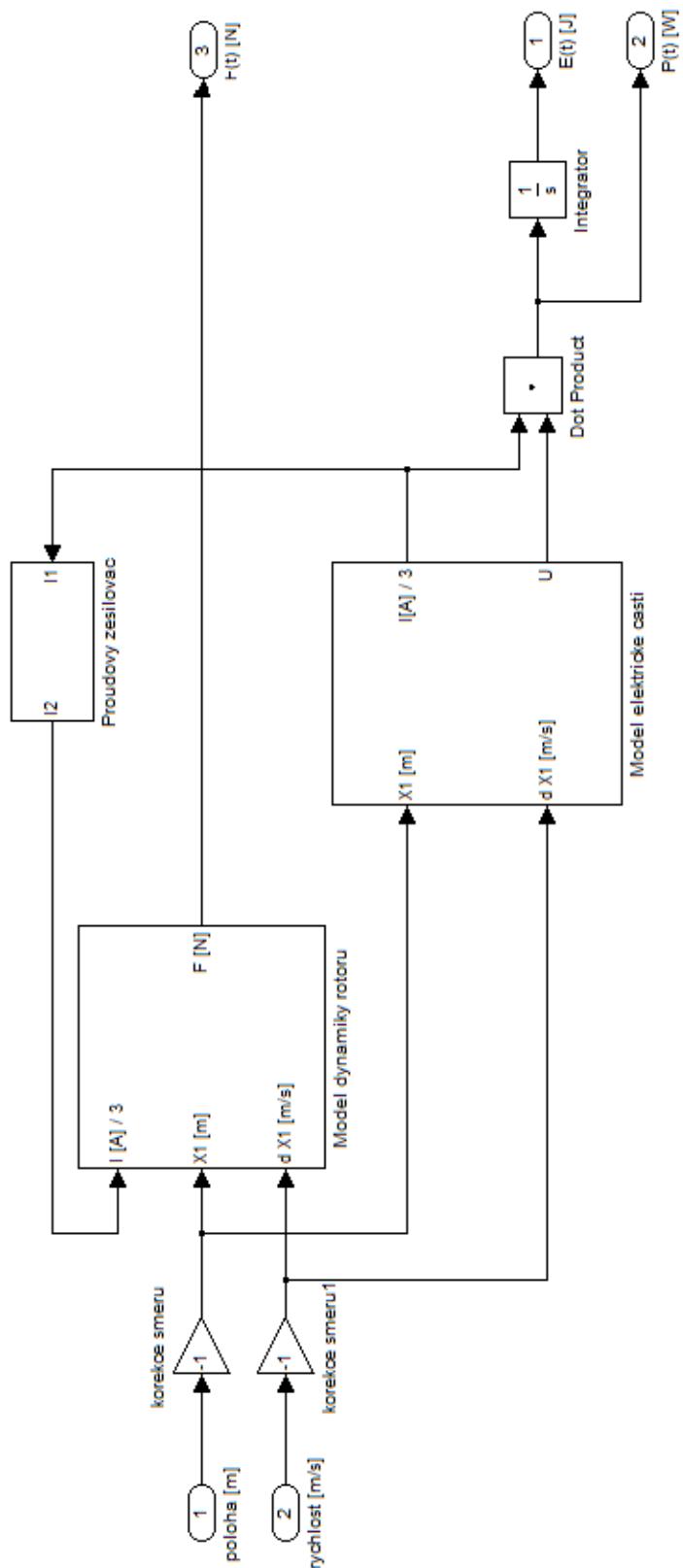
## A.2 Model



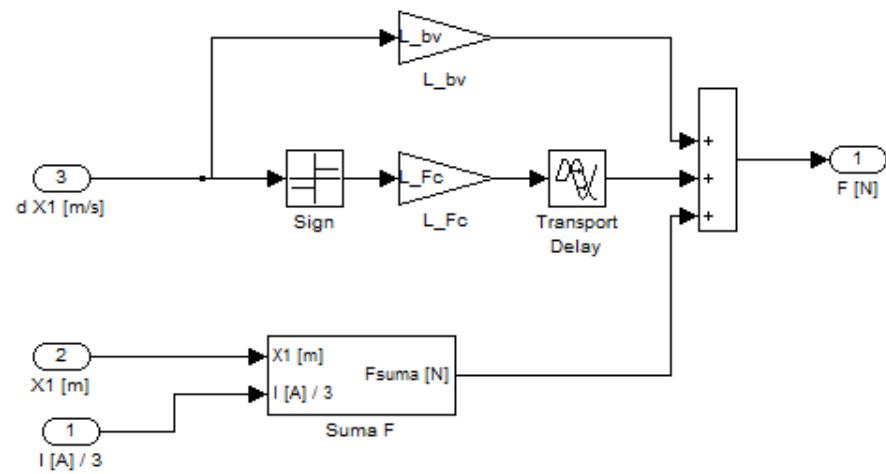
Obrázek A.1: Model kompletního systému



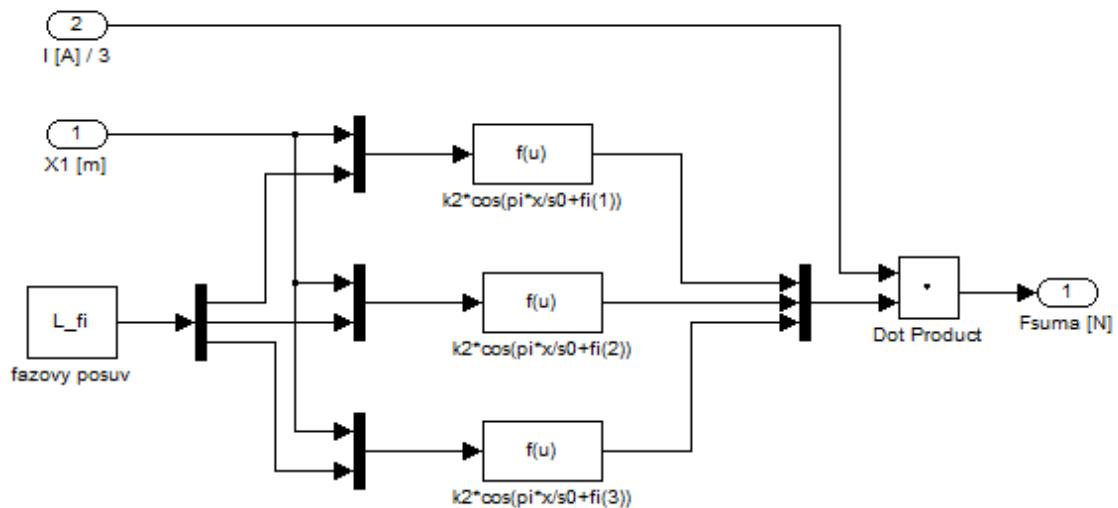
Obrázek A.2: Model odpružení s lineárním motorem



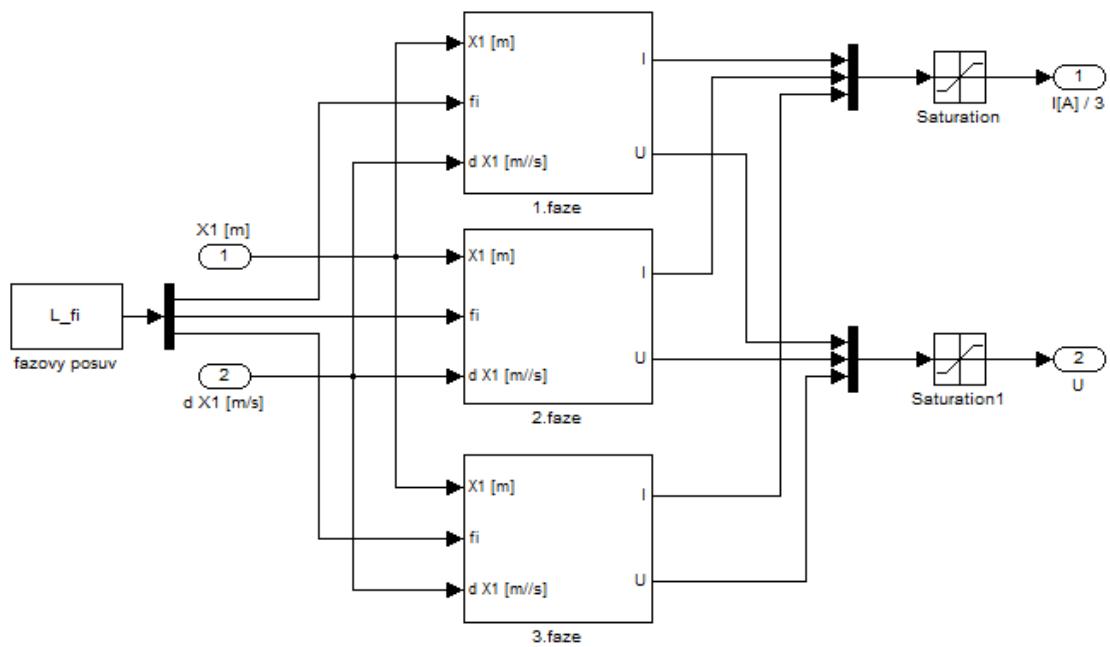
Obrázek A.3: Model lineárního motoru



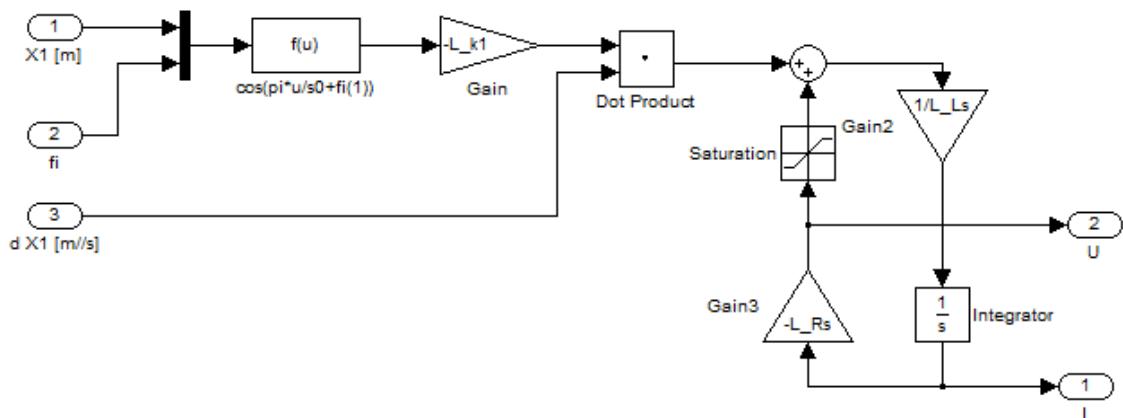
Obrázek A.4: Dynamika rotoru



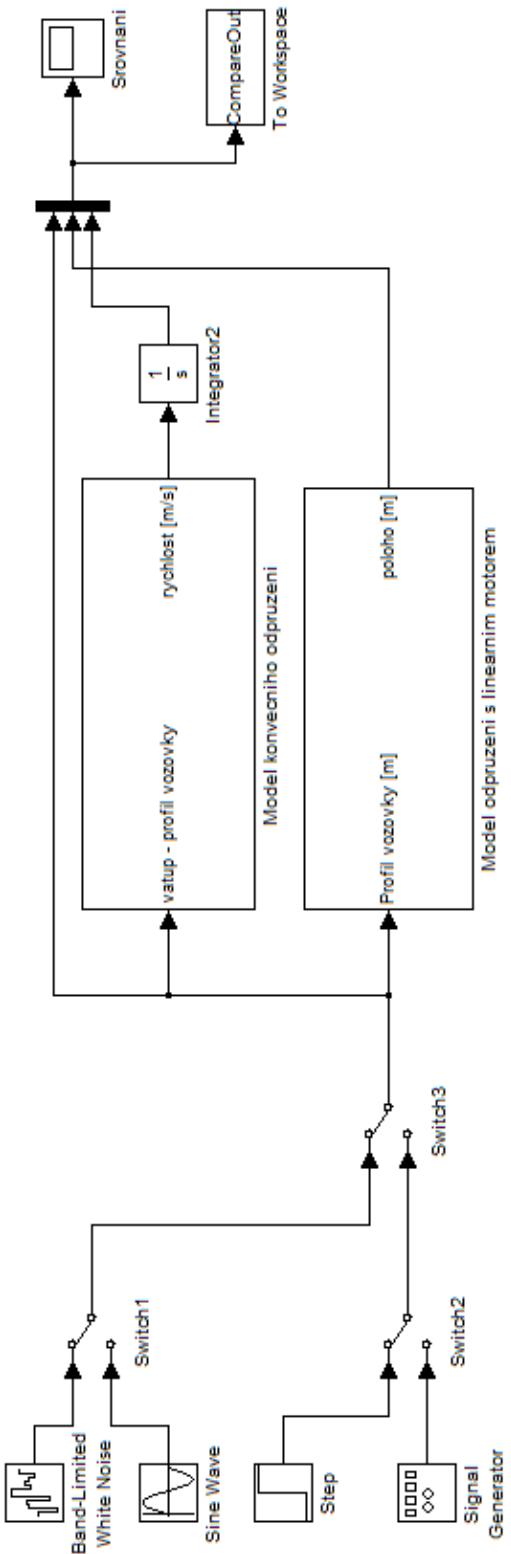
Obrázek A.5: Suma F



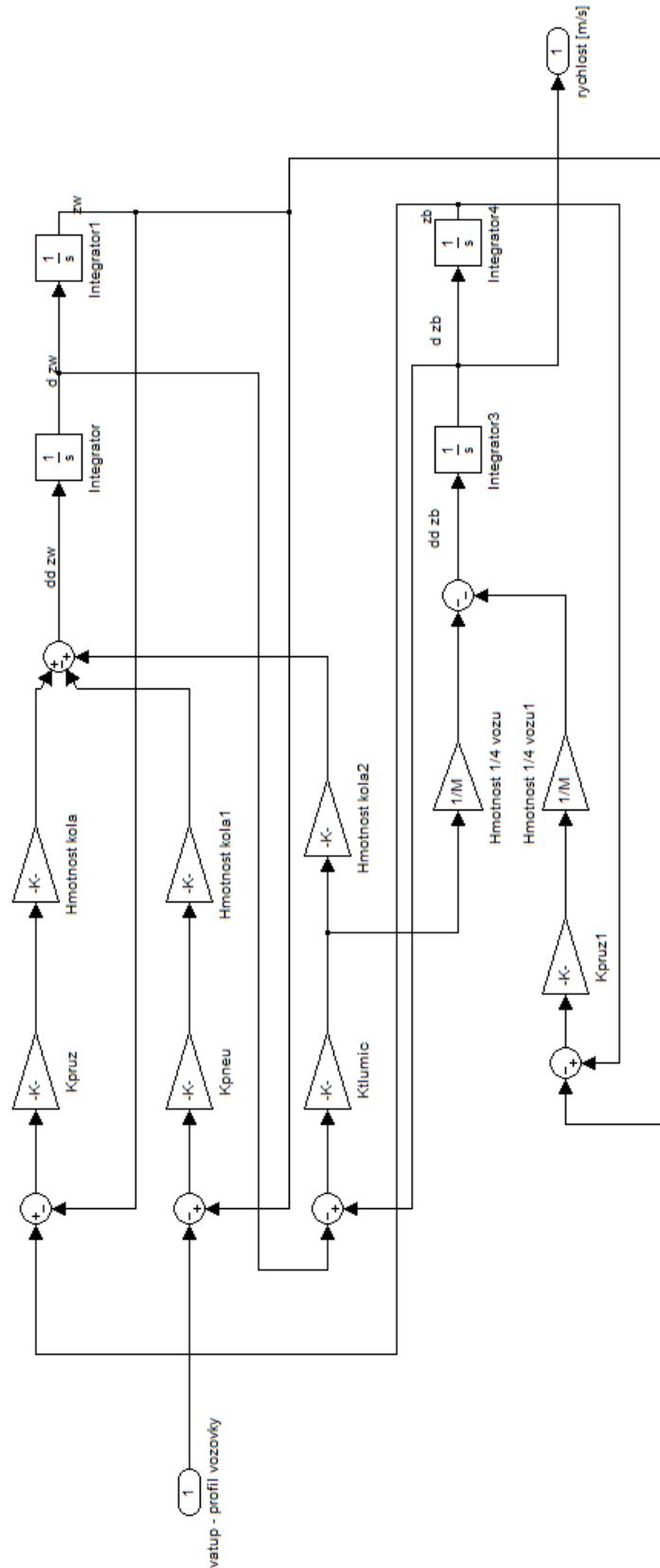
Obrázek A.6: Elektrická část



Obrázek A.7: 1.Fáze



Obrázek A.8: Model pro srovnání systémů



Obrázek A.9: Model systému s kapalinovým tlumičem

## **Příloha B**

### **Lineární elektrický motor**

# ThrustTube Modules

## ThrustBlock Range



The symmetrical design of the ThrustTube linear servo motor is incorporated into a single rail stage design called the ThrustTube module. This rugged but high performance platform brings the exceptional performance of linear motors to the world of mainstream industrial automation.

ThrustTube modules can be easily combined to form XY gantry solutions. For users requiring high repeatability and throughput, the ThrustTube module is the most cost effective linear motor stage solution on the market today.

Based on a proven single rail format, ThrustTube modules are also a highly attractive alternative to traditional technologies such as ball screw modules, pneumatic actuators and belt drive actuators.

The ThrustTube Module family is the most comprehensive range of linear motor stages available and incorporates module configurations with high-speed bellows, high precision units, and units for special environments including food, wet and clean room applications.



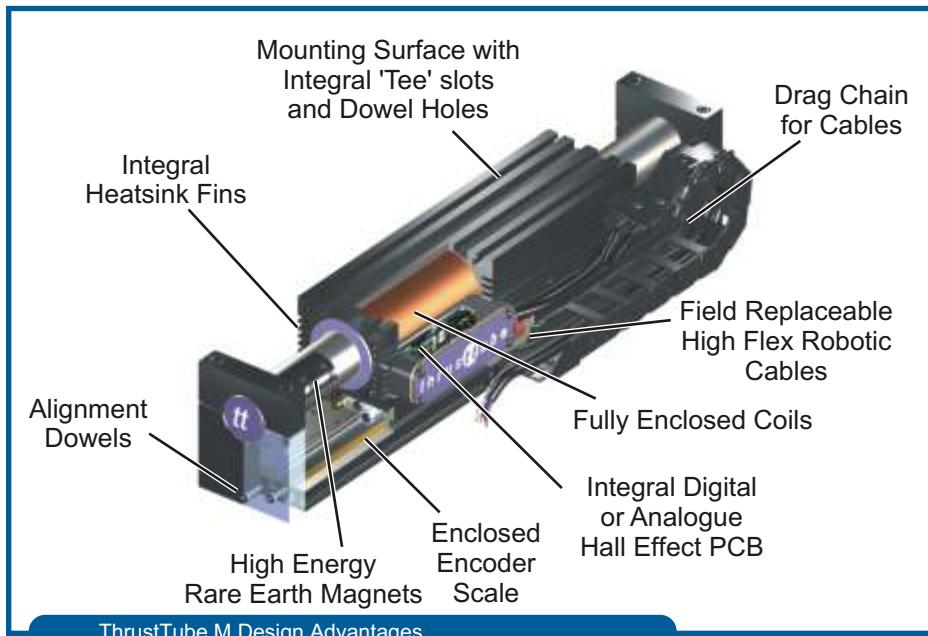
ThrustTube Module products comprise the patented ThrustTube motor components mounted in a robust extruded aluminium channel to make a ready-to-use motion axis. The motors are electrically identical to standard brushless drives and can be powered by a range of conventional servo drives.

Modules are supplied based around two basic sizes of Thrust Rod, 25mm and 38mm, each with four sizes of Thrust Block available depending on the specific application needs. An extra force option (TBX) utilising an iron sleeve core provides extra useable force at the expense of some coglessness where applications allow.

ThrustTube Modules are easy to install with the Thrust Block and three faces of the mounting bar featuring T slots for rapid and secure clamping, while the block itself features direct payload alignment via dowel holes for maximum ease-of-use. Field replaceable robotic cables provide additional savings in downtime and cost of ownership.

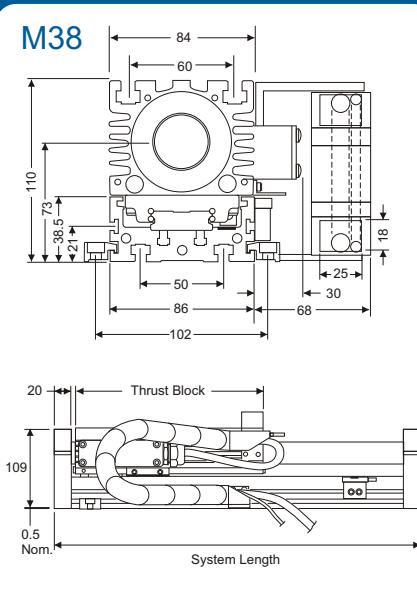
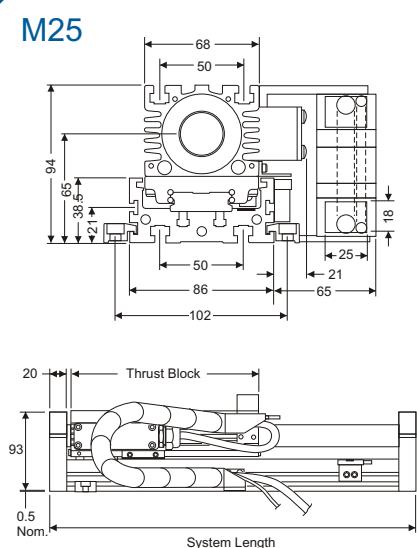
An integrated enclosed encoder, commutation, cabling and cable management options plus a family of matched amplifiers and drives complete this ready-to-use package, although with interchangeable hall effect boards this versatile module can be used with virtually any servo amplifier.





#### ThrustTube M Design Advantages

#### ThrustTube M Dimensions



TB Forcer Type	3810	3808	3806	3804	2510	2508	2506	2504	Units
Maximum Travel	1655	1726	1797	1868	1459	1510	1561	1612	mm
Constrained Vert. Straightness	60	60	60	60	60	60	60	60	μm/m
Constrained Horz. Straightness	80	80	80	80	80	80	80	80	μm/m
Encoder	Optical	5μm, 1μm, 0.5μm, 0.2μm, 0.1μm & Analogue Sin/Cos output							
	Magnetic	10μm, 5μm, 1μm & Analogue Sin/Cos output							
Peak Velocity	2.5	3.1	4.2	6.4	5.9	7.3	9.7	14.5	m/s
Peak Acceleration	772	763	754	727	642	637	620	589	m/s/s
Forcer Mass (inc. Bearing)	5.90	4.90	3.90	2.90	3.25	2.75	2.25	1.45	Kg
Module Mass/m (Excl. Forcer)	15.2	15.2	15.2	15.2	10.4	10.4	10.4	10.4	Kg/m
Motor/Backing Material/Finish	Aluminum Alloy with 15 - 25μm black anodised coating.								
Peak Force	3960	3168	2376	1584	1560	1248	936	624	N
Intermittent Force	880	704	528	352	390	312	234	156	N
Continuous Force	223	187	146	104	95	79	62	44	N

TBX Forcer Type	3810	3808	3806	3804	2510	2508	2506	2504	Units
Maximum Travel	1255	1326	1647	1718	1359	1410	1461	1512	mm
Constrained Vert. Straightness	60	60	60	60	60	60	60	60	μm/m
Constrained Horz. Straightness	80	80	80	80	80	80	80	80	μm/m
Encoder	Optical	5μm, 1μm, 0.5μm, 0.2μm, 0.1μm & Analogue Sin/Cos output							
	Magnetic	10μm, 5μm, 1μm & Analogue Sin/Cos output							
Peak Velocity	2.7	3.3	4.5	6.7	5.8	7.3	9.7	14.5	m/s
Peak Acceleration	744	740	726	700	622	622	611	573	m/s/s
Forcer Mass (inc. Bearing)	6.00	5.00	4.00	3.00	3.30	2.80	2.30	1.50	Kg
Module Mass/m (Excl. Forcer)	15.2	15.2	15.2	15.2	10.4	10.4	10.4	10.4	Kg/m
Motor/Backing Material/Finish	Aluminum Alloy with 15 - 25μm black anodised coating.								
Peak Force	3906	3125	2344	1562	1548	1238	929	619	N
Intermittent Force	930	744	558	372	430	344	258	172	N
Continuous Force	263	221	178	130	110	92	72	52	N

Note: A maximum of 5 m/s velocity is recommended for bearing longevity.

#### ThrustTube M Ordering Information

A full range of options are available including:

- ▶ Bearing grades, caged and pre-loaded bearings
- ▶ Digital or Analogue Hall Effect Commutation
- ▶ Various Cable Configurations & Lengths
- ▶ Various Cable Terminations
- ▶ Larger drag chain for cable management
- ▶ Limit Switches

Other Modules available in the range are MB (Bellows) PM (Precision) ME (Environmental)

Refer to the ThrustTube order guide for further information.

[www.copleymotion.com](http://www.copleymotion.com)



## TBX motor properties (DS01047/F)

### 1. Description

This datasheet details the electrical, thermal and mechanical properties of the TBX series of tubular linear motors. For a more detailed explanation of these properties please see datasheet DS01051.

### 2. Electrical properties

MOTOR TYPE	3810	3808	3806	3804	2510	2508	2506	2504	units
Peak force @ 25°C ambient for 1 sec	1860	1488	1116	744	860	688	516	344	N
Peak current @ 25°C ambient for 1 sec	20	20	20	20	20	20	20	20	A <sub>pk</sub>
With 25x25x2.5cm heatsink plate									
Continuous stall force @ 25°C ambient	293.2	247.2	205.9	156.2	120.4	101.6	81.8	59.8	N
Continuous stall current @ 25°C ambient	2.23	2.35	2.61	2.97	1.98	2.09	2.24	2.46	A <sub>rms</sub>
	3.15	3.32	3.69	4.20	2.80	2.96	3.17	3.48	A <sub>pk</sub>
Without heatsink plate									
Continuous stall force @ 25°C ambient	255.1	214.6	172.0	126.8	107.6	89.9	70.4	50.5	N
Continuous stall current @ 25°C ambient	1.94	2.04	2.18	2.41	1.77	1.85	1.93	2.08	A <sub>rms</sub>
	2.74	2.88	3.08	3.41	2.50	2.62	2.73	2.94	A <sub>pk</sub>
Force constant (sine commutation)	131.5	105.2	78.9	52.6	60.8	48.6	36.5	24.3	N/A <sub>rms</sub>
	93.0	74.4	55.8	37.2	43.0	34.4	25.8	17.2	N/A <sub>pk</sub>
Back EMF constant (phase to phase)	107.4	85.9	64.4	43.0	49.7	39.7	29.8	19.9	V <sub>pk</sub> /m/s
Fundamental motor constant	23.00	20.58	17.77	14.56	11.92	10.64	9.20	7.51	N/√W
Sleeve cogging force	5.6	8.3	4.2	7.3	3.0	3.3	3.2	2.2	+/-N
Resistance @ 25°C (phase to phase)	16.93	13.54	10.16	6.77	13.51	10.81	8.11	5.40	Ohm
Resistance @ 100°C (phase to phase)	21.82	17.45	13.10	8.73	17.41	13.93	10.45	6.96	Ohm
Inductance @ 1kHz (phase to phase)	21.30	17.04	12.78	8.52	10.80	8.64	6.48	4.32	mH
Electrical time constant	1.26	1.26	1.26	1.26	0.80	0.80	0.80	0.80	ms
Continuous working voltage	380	380	380	380	380	380	380	380	V d.c.
Pole pitch (one electrical cycle)	71.2	71.2	71.2	71.2	51.2	51.2	51.2	51.2	mm

### 3. Thermal properties

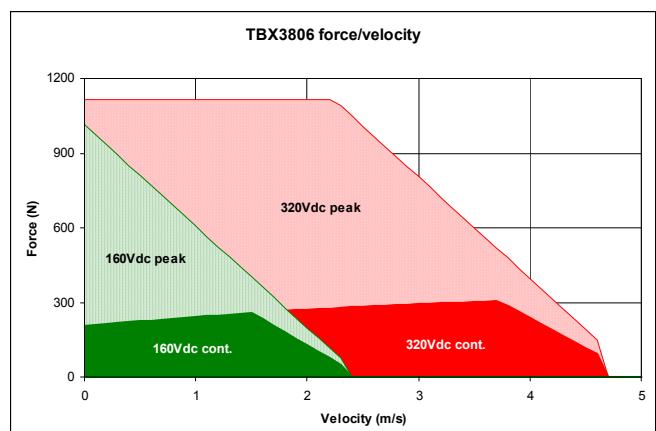
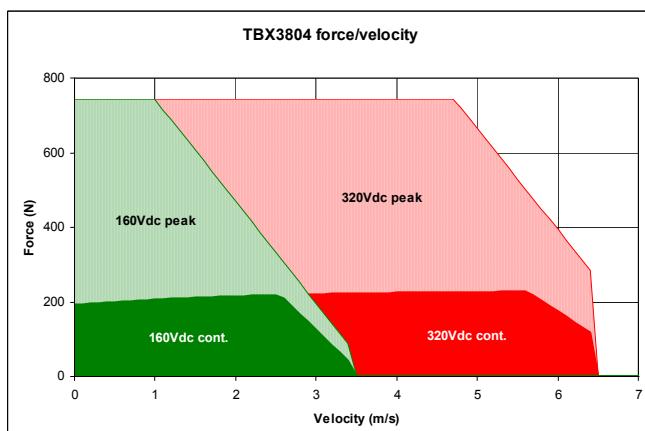
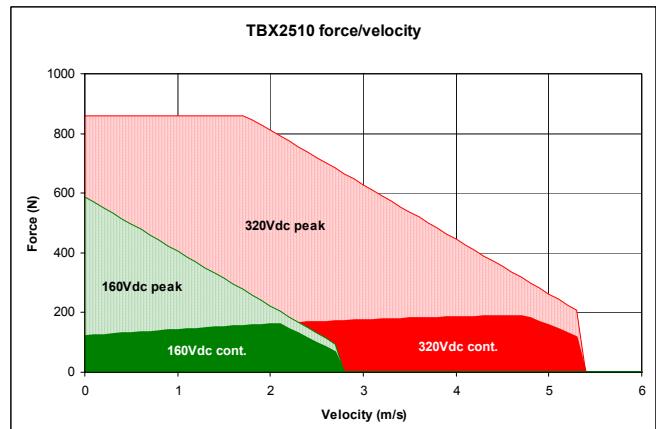
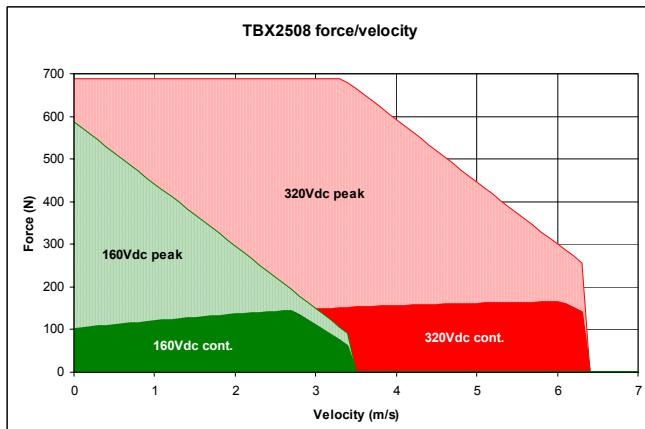
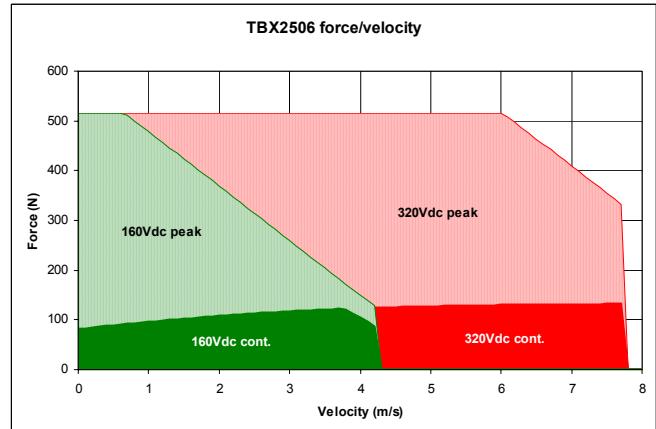
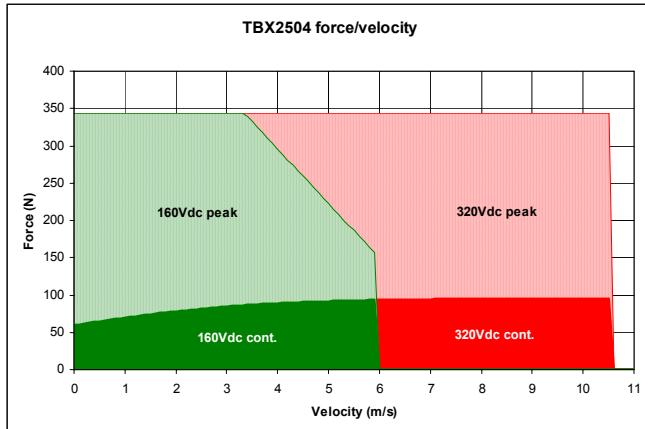
MOTOR TYPE	3810	3808	3806	3804	2510	2508	2506	2504	units
Maximum phase temperature	100	100	100	100	100	100	100	100	°C
Thermal resistance R <sub>th</sub> <sub>phase-housing</sub>	0.11	0.12	0.13	0.16	0.15	0.17	0.21	0.28	°C/W
With 25x25x2.5cm heatsink plate									
Power dissipation @ 25°C ambient	163.0	144.2	133.9	115.4	102.7	91.5	78.9	63.0	Watt
Thermal resistance R <sub>th</sub> <sub>housing-ambient</sub>	0.35	0.39	0.43	0.49	0.58	0.65	0.74	0.91	°C/W
Without heatsink plate									
Power dissipation @ 25°C ambient	123.0	108.7	93.7	75.8	81.5	71.4	58.6	45.2	Watt
Thermal resistance R <sub>th</sub> <sub>housing-ambient</sub>	0.50	0.57	0.67	0.83	0.77	0.88	1.07	1.38	°C/W
Thermal time constant	1900	1727	1518	1265	1355	1217	1120	993	s

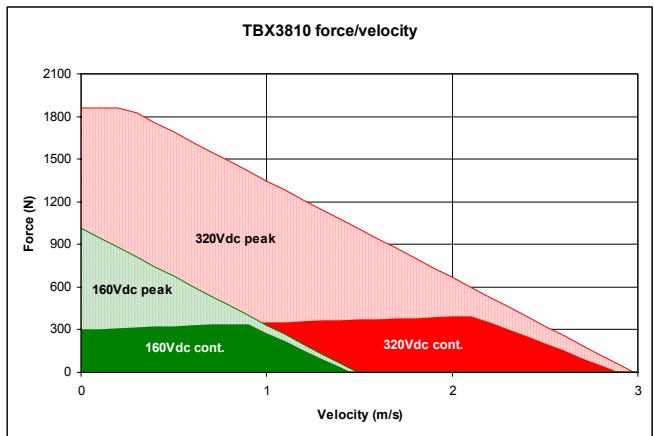
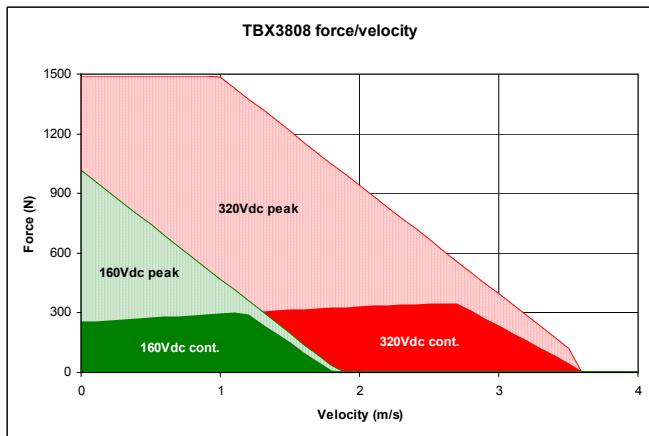
### 4. Mechanical properties

MOTOR TYPE	3810	3808	3806	3804	2510	2508	2506	2504	units
Forcer mass (excluding bearings)	5.25	4.20	3.25	2.25	2.50	2.00	1.50	1.10	Kg
Thrust rod mass/metre	8.3	8.3	8.3	8.3	3.5	3.5	3.5	3.5	Kg/m
Forcer mass (including bearings)	6.00	5.00	4.00	3.00	3.30	2.80	2.30	1.50	Kg
Motor module mass (excluding forcer)/m	15.2	15.2	15.2	15.2	10.4	10.4	10.4	10.4	Kg/m
Forcer length (including buffers)	380	309	238	167	276	225	174	121	mm

## 5. Force / velocity profiles

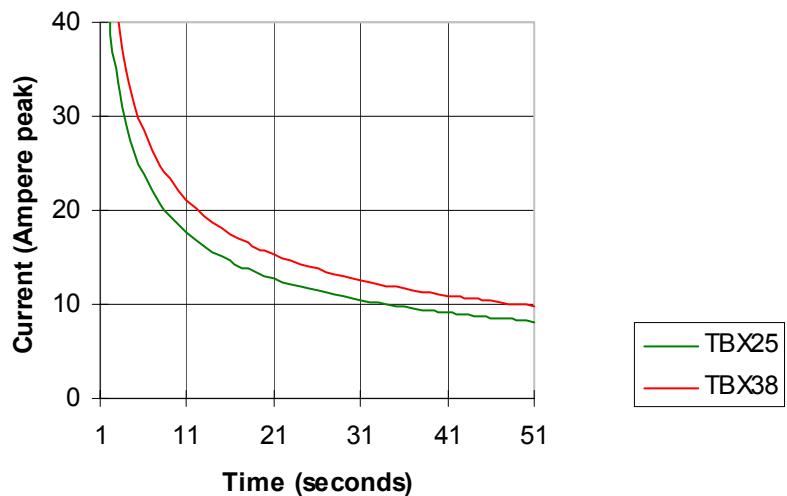
These profiles assume the continuous working voltage is available across the motor (there are no amplifier limitations) and that there is an additional heatsink plate. The continuous ratings are for a maximum motor phase temperature of 100°C and include cooling effects from motor movement while peak ratings are for an initial motor phase temperature of 25°C rising to 100°C.





## 6. Overload characteristics

This graph shows the time required to heat the motor phases from 25°C to 100°C for a given peak current and a typical motor from the range.



## **Příloha C**

### **Obsah přiloženého CD**

K této práci je přiloženo CD, na kterém jsou uloženy zdrojové kódy.

- Simulink: Modely systémů
- Simulink/Output: Odezvy systémů na vstupní signály
- Appendix: Přílohy
- X35BAP: Bakalářská práce ve formátu PDF