

Technická univerzita v Liberci



Možnosti uplatnění elektrodynamického pohonu rozvádění na doprředacích strojích

disertační práce

Josef Černohorský

2006



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Možnosti uplatnění elektrodynamického pohonu rozvádění na doprředacích strojích

Disertační práce

2006

Josef Černohorský



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

**Možnosti uplatnění elektrodynamického pohonu rozvádění
na doprředacích strojích**

Ing. Josef Černohorský

Studijní program: P 2612 Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: 2612V045 Technická kybernetika

Pracoviště: Katedra elektrotechniky
Fakulta mechatroniky a mezioborových
inženýrských studií
Technická univerzita v Liberci
Hálkova 6, 4761 17 Liberec 1

Školitelé: Prof. Ing. Aleš Richter, CSc.
Ing. Jiří Sloupenský, CSc.

Rozsah práce a příloh:

Počet stran:	121
Počet příloh:	2
Počet obrázků:	52
Počet tabulek:	9
Počet grafů:	16
Počet schémat:	4
Počet vzorců:	88

říjen 2006

Prohlášení

Místopřísežně prohlašuji, že jsem disertační práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci 1. ledna 2006

Ing. Josef Černohorský

Poděkování

Děkuji školitelům Prof. Ing. Aleši Richterovi, CSc. a Ing. Jiřímu Sloupenskému CSc. za odborné vedení během celého doktorského studia a zejména za podnětné připomínky během zpracování disertační práce. Dále děkuji firmě Rieter CZ a.s. za zpřístupnění interních podnikových materiálů a informací. Děkuji Ing. Petru Střešíkovi za vytvoření nadstandardních podmínek na detašovaném pracovišti ve Výzkumném ústavu textilních strojů Liberec a.s..

Děkuji Ing. Janu Václavíkovi za ulehčení těžkých začátků se signálovými procesory Analog Devices a Doc. Ing. Pavlu Rydlovi Ph.D. za náměty k přemýšlení a realizaci v oblasti řízení pohonů.

Anotace

Možnosti uplatnění elektrodynamického pohonu rozvádění na dopřádacích stojích

Ing. Josef Černohorský

Disertační práce se zabývá možnostmi modernizace pohonu rozvádění na textilních strojích. Rozvádění je využíváno na celé řadě textilních stojích. Současná řešení rozvádění pomocí speciálního mechanismu poháněného rotačním pohonem přestává být vyhovující vzhledem ke stále se zvyšujícím nárokům na kvalitu návinnu příze.

Řešení pohonu rozvádění je díky jeho přímé vazbě na textilní technologie a mechaniku stroje složitým mechatronickým uzlem.

Práce analyzuje možnosti modernizace systému rozvádění z hlediska využití konvenčních pohonů a speciálních konstrukcí pro individuální rozvádění. Dále byl identifikován a modelován systém rozváděcí tyče. Dále byl popsán, vypracován a ověřen model motoru a pohonu založeném na elektrodynamickém principu. Na funkčním modelu byly ověřeny možnosti řízení v otevřené regulační smyčce pomocí jednoduchého mikrokontroléru.

Hlavním přínosem je ověření možnosti uplatnění elektrodynamického pohonu řízeného pomocí signálového procesoru v uzavřené regulační smyčce. Pohon je možné parametrovat a ovládat pomocí CAN sběrnice. Elektrodynamický pohon je použitelný nejen v textilním průmyslu, ale obecně pro realizaci lineárního pohybu s definovaným průběhem. Výsledky této práce ukazují i další praktické realizace.

Klíčová slova: elektrický pohon, elektrodynamický systém, rozvádění, signálový procesor

Annotation

Possibilities of electrodynamic drive usage on unwinding machines

Ing. Josef Černohorský

The doctoral thesis deals with possibilities of unwinding drive modernization in textile machines. Present unwinding drive system consists of a rotary drive and a special mechanism. This solution is not able to achieve higher quality of the yarn during a high winding speed.

In the first part of the thesis there is an analysis containing several types of drives, including non conventional drive types for individual winding. The thesis consists of unwinding shaft identification and of a mathematical model of unwinding shaft too. In the second part there is a mathematical model of electrodynamic drive. There were experimented open and closed loop control algorithms at the laboratory function model

The result of the thesis is a functional model of electrodynamic drive, controlled via Digital Signal Processor in closed feed back loop. The drive is configurable through CAN by drive parameters.

The electrodynamic drive is useable both in textile industry and defined position of linear motion in general.

Keywords: electrical drive, electrodynamic system, unwinding, digital signal processing

1	ÚVOD	3
1.1	VOLBA TRAJEKTORIE ROZVÁDĚNÍ S OHLEDEM NA DYNAMIKU STROJE	5
2	SOUČASNÁ ŘEŠENÍ ROZVÁDĚNÍ PŘÍZE NA TEXTILNÍCH STROJÍCH.....	14
3	IDENTIFIKACE SYSTÉMU ROZVÁDĚCÍ TYČE.....	22
4	NOVÉ MOŽNOSTI ŘEŠENÍ POHONU ROZVÁDĚNÍ.....	32
4.1	MODERNIZACE SKUPINOVÉHO ROZVÁDĚNÍ	32
4.1.1	<i>Dimenzování lineárního pohonu</i>	<i>35</i>
4.2	MOŽNOSTI INDIVIDUÁLNÍHO ROZVÁDĚNÍ	40
5	ELEKTRODYNAMICKÝ POHON ROZVÁDĚNÍ.....	48
5.1	OVĚŘENÍ FUNKCE ELEKTRODYNAMICKÉHO MOTORU.....	51
5.2	MATEMATICKÝ MODEL ELEKTRODYNAMICKÉHO MOTORU	54
5.3	NÁVRH ELEKTRONIKY SENZORU POLOHY	59
6	LABORATORNÍ MODEL ELEKTRODYNAMICKÉHO POHONU	62
6.1	BUZENÍ FUNKČNÍM GENERÁTOREM	62
6.2	VYUŽITÍ MIKROPROCESORU ADUC 812.....	63
7	ZPĚTNOVAZEBNÍ REGULAČNÍ STRUKTURY PRO ŘÍZENÍ POHONŮ.....	68
7.1	REALIZACE PROPORCIONÁLNĚ SUMAČNÍHO REGULÁTORU	68
7.1.1	<i>Možnosti zlepšení PS regulace pohonů</i>	<i>70</i>
7.2	REGULAČNÍ STRUKTURA ELEKTRODYNAMICKÉHO POHONU.....	72
7.2.1	<i>Další metody zkvalitnění regulace elektrodynamického pohonu.....</i>	<i>74</i>
7.2.2	<i>Nastavení regulátorů.....</i>	<i>76</i>
8	NÁVRH FUNKČNÍHO MODELU ELEKTRODYNAMICKÉHO POHONU	82
8.1	VÝVOJ HARDWARU ELEKTRODYNAMICKÉHO POHONU	82
8.1.1	<i>Řídící deska ADSP 21992.....</i>	<i>82</i>
8.1.2	<i>Výkonová deska IR 2130</i>	<i>83</i>
8.2	VÝVOJ SOFTWARE PRO DIGITÁLNÍ SIGNÁLOVÝ PROCESOR.....	89
8.2.1	<i>Inicializace procesoru</i>	<i>92</i>
8.2.2	<i>Realizace proudové zpětné vazby.....</i>	<i>92</i>
8.2.3	<i>Realizace rychlostní zpětné vazby.....</i>	<i>97</i>
8.2.4	<i>Realizace polohové zpětné vazby.....</i>	<i>98</i>
8.2.5	<i>Komunikace DSP s okolím</i>	<i>99</i>
8.2.6	<i>Obsluha systémových funkcí.....</i>	<i>100</i>
8.3	VÝVOJ SOFTWARE PRO NADŘÍZENÝ ŘÍDÍCÍ SYSTÉM	105
9	VÝSLEDKY FUNKČNÍCH ZKOUŠEK.....	110
10	ZÁVĚR.....	114
	SEZNAM NEJPOUŽÍVANĚJŠÍCH SYMBOLŮ.....	116
	SEZNAM INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	119

1 Úvod

Pravidelný lineární vratný pohyb spolu s rotačním pohybem je využíván jako základ mnoha technologických procesů a výrobních operací. V závislosti na rychlosti, síle a přesnosti polohování jsou realizovány různými prostředky. Od konvenčních pneumatických válců s jednoduchým ovládáním, přes složité mechanické převodovky či vačky poháněné konvenčními rotačními pohony až po lineární synchronní servomotory s vysokou přesností využívané v *CNC* obrábění.

Speciálním odvětvím, kde jsou kladené vysoké nároky na dynamiku a rychlost, je oblast textilních strojů. Lineární pohyb je nutný například k rozvádění příze na dopřádacích strojích, soukacích strojích či skacích strojích, ale i k pohybu listů na tkacích stavech.

Dopřádací stroj je textilní stroj, který z polotovaru ve formě pramene vláken přírodního či syntetického materiálu vyrábí přízi. Pramen je skladován v konvích válcového či kvádrového průřezu, vyrobená příze ve formě návínů na dutinkách. Na dopřádací stroje jsou kladeny vysoké nároky na produkci, variabilitu a minimální zástavbové rozměry. Stroje musí být schopné vyrobit náviny v různých šířkách a s různým úhlem křížení.^[26] Pro vysokou produktivitu dosahují navíjecí rychlosti až 200 m/min , což znamená rychlost polohování příze rychlostí vyšší než 1 m/s a prakticky skokovou změnu rychlosti v úvrati 2 m/s . Doba trvání periody pohybu dosahuje přibližně $0,3\text{ s}$.^[18]

Z důvodu nízkých zástavbových rozměrů, snadné přepravy a výrobní ceny na jedno dopřádací místo je celý stroj složený ze sekcí. V sekci je vždy několik dopřádacích míst. Vlastní dopřádací stroj se potom skládá z hlavní pohonné jednotky a sudého počtu sekcí (díky symetrii) a dalšího příslušenství. Počet sekcí určuje také celkovou délku stroje, ta činí až několik desítek metrů.

Po vlastním zpracování je příze rozváděna na dutinku pomocí rozváděcí tyče. Vzhledem k velké délce stroje musí mít tyč vysokou tuhost. Relativně nehmotná příze je polohována pomocí relativně těžké tyče. Rozváděcí tyč je rotačním pohonem se speciální převodovkou. Dalším přírůstkem pohybující hmotnosti je moment setrvačnosti převodovky a motoru. Toto mechanické uspořádání není výhodné z hlediska modifikace parametrů návínu. Dalším problémem je nestejnomyšlnost parametrů návínu na různých místech rozváděcí tyče. Stávající

mechanické upořádání pohonu prakticky nedovoluje zvýšit rychlost, tedy produktivitu stroje, při zachování kvality návinů.

Problematikou rozvádění se zabývá celá řada zlepšovacích návrhů a patentů. Jsou aplikovány postupy vedoucí k zvýšení tuhosti a snížení hmotnosti rozváděcí tyče. Dále jsou navrženy postupy umístění a řízení pohonů tak, ^[1] aby eliminovaly parazitní vlastnosti rozváděcí tyče. Také jsou navrženy speciální pohony poměrně složité konstrukce pro rozvádění v rámci jednoho rozváděcího místa. Vzhledem k poptávce po nových doprřadacích strojích, či po repasích starších typů, je toto odvětví aplikačně zajímavé.

Řešení pohonu rozvádění je díky jeho přímé vazbě na textilní technologie a mechaniku stroje složitým mechatronickým uzlem, kde se navíc protíná jak silnoproudá elektronika, tak i algoritmy založené na distribuovaném řízení.

Speciální lineární pohon s vysokou dynamikou a jednoduchou konstrukcí by měl využití nejen v textilním průmyslu, ale i v ostatních odvětvích, kde je nutné provádět lineární pohyb s definovaným časovým průběhem polohy.

1.1 Volba trajektorie rozvádění s ohledem na dynamiku stroje

Rozvádění je periodické přestavování polohy, periodický pohyb příze vůči dutince cívky za účelem vytvoření návínu. Celý pohyb se odehrává v jednom rozměru, tedy po přímce.

Pohyb je změna polohy tělesa vůči jiným tělesům nebo vztažné soustavě. Periodickým pohybem rozumíme pohyb^[4], kdy platí rovnice (1.1) pro všechna t .

$$(1.1) \quad y(t) = y(t + T)$$

Po čase, který nazýváme periodou pohybu T , se celý pohyb opakuje. Základním požadavkem na rozvádění je rovnoměrné umístění příze na dutinku. To můžeme zajistit například trajektorií typu pila.

Pro snadné matematické odvození budeme uvažovat funkci $y(t)$ popsanou rovnicemi (1.2) a (1.3) s periodou 2π .

$$(1.2) \quad y_1(t) = x, x \in [0, \pi)$$

$$(1.3) \quad y_2(t) = \pi - (x - \pi), x \in [\pi, 2\pi)$$

Funkce polohy je v celém intervalu spojitá ale není hladká. Pro její další popis můžeme při 2π periodě využít rozvoje pomocí trigonometrické řady podle (1.4).

$$(1.4) \quad y(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n a_k \cos(k \cdot x) + b_k \sin(k \cdot x)$$

kde koeficienty řady určíme pomocí (1.5) a (1.6).

$$(1.5) \quad a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cdot \cos(k \cdot x) dx$$

$$(1.6) \quad b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cdot \sin(k \cdot x) dx$$

Pilu tedy můžeme s využitím trigonometrického rozvoje zapsat ve tvaru (1.7), kde vlivem sudosti funkce budou zastoupeny pouze cosinové složky.

$$(1.7) \quad f(x) = \frac{\pi}{2} - \frac{4}{\pi} \left(\frac{\cos(x)}{1^2} + \frac{\cos(3x)}{3^2} + \frac{\cos(5x)}{5^2} + \dots \right)$$

Derivace této funkce polohy, rychlost, není v bodech $k\pi$ spojitá, což má za následek limitní hodnoty zrychlení. Proto není možné v bodech $k\pi$ využít pro rozvádění pilový průběh.

Pro zajištění hladké funkce ryvu (derivace zrychlení) je nutné nahradit okolí bodu $k\pi$ funkcí harmonickou nebo funkcí polynomiální vyššího stupně.

Při náhradě harmonickou funkcí (1.8)

$$(1.8) \quad f(x) = a \cdot \cos(x)$$

máme zajištěný hladký průběh i čtvrté derivace polohy, ryv. Touto změnou ale nezajistíme rovnoměrné kladení příze na cívku. Problematické je také místo přechodu z lineárního úseku na harmonický. Proto se využívá harmonických funkcí vyššího stupně nebo funkcí typu karditida. Náhradou užšího okolí se ale hodnota zrychlení a jeho derivace zvyšují.

Při náhradě polynomiální funkcí je vhodné volit stupeň polynomu vyšší nebo roven v (1.9), pro hladký průběh ryvu podle (1.12).

$$(1.9) \quad f(x) = x^5$$

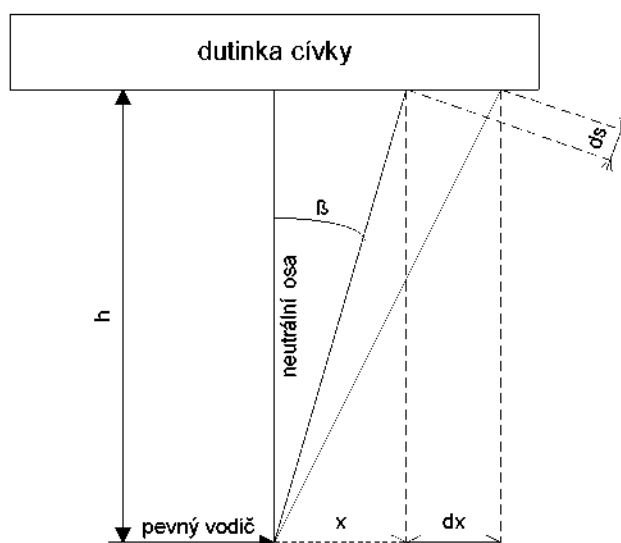
$$(1.10) \quad \frac{d}{dx} f(x) = 5 \cdot x^4$$

$$(1.11) \quad \frac{d^2}{dx^2} f(x) = 20 \cdot x^3$$

$$(1.12) \quad \frac{d^3}{dx^3} f(x) = 60 \cdot x^2$$

Další možností je využití harmonické funkce v celém rozsahu. Harmonická funkce je hladká do libovolného stupně derivace, což je výhodné. Pokud by ale k rozvádění byla využita harmonická funkce, bylo by zapotřebí modifikovat i navíjecí rychlost pro zajištění rovnoměrné stavby návínu.

Při rozvádění je poloha příze představována vůči její základní poloze. Vzdálenost mezi výchozím bodem, například pevným vodičem, kterým je příze vedena, a místem kladení na dutinku se ale během rozvádění mění podle Obr. 1.1. Velikost této změny závisí na aktuální poloze příze na dutince podle (1.13) a v menší míře i na změně průměru návínu, tedy množství již navinuté příze.



Obr. 1.1 - Vznik přídavné rychlosti při rozvádění

$$(1.13) \quad ds = dx \cdot \sin \beta$$

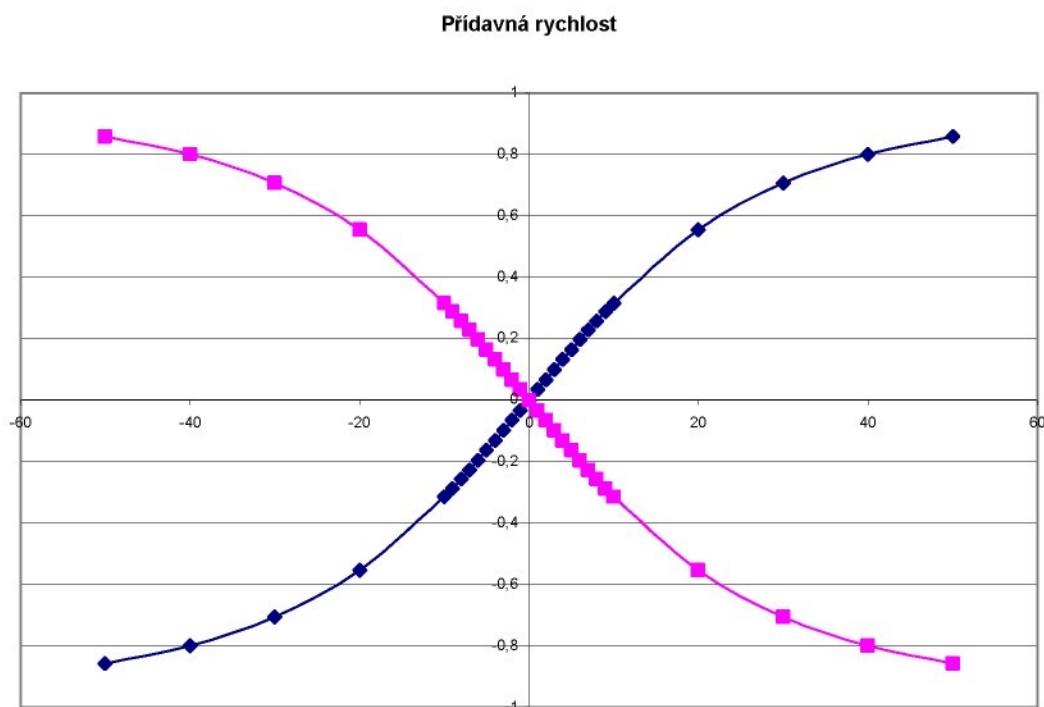
$$(1.14) \quad ds = \frac{x \cdot dx}{\sqrt{x^2 + h^2}}$$

Tato změna délky má za následek vznik přídavné rychlosti^[14]. Velikost přídavné rychlosti pak můžeme určit časovou derivací podle (1.15).

$$(1.15) \quad \frac{ds}{dt} = v_p = \frac{x \cdot \frac{dx}{dt}}{\sqrt{x^2 + h^2}}$$

$$(1.16) \quad v_r = \frac{dx}{dt}$$

kde (1.16) je rychlost rozváděcí. Přídavná rychlost potom bude mít průběh podle grafu, Graf 1.1.



Graf 1.1 - Průběh přídavné rychlosti při rozvádění

Vliv přídavné rychlosti se tedy uplatní nejvíce u širokých cívek. Na krajích návínu přechází rozváděcí rychlost z kladné na zápornou a tak i přídavná rychlost mění svůj smysl. Absolutní změna přídavné rychlosti je teda rovna dvojnásobku přídavné rychlosti. Právě tato změna má za následek navolnění příze, což může způsobit nesprávnou stavbu návínu. Změna v druhém smyslu má za následek protažení příze až případný přetrh příze. Pro vykompenzování přídavné rychlosti by bylo nutné řídit rychlost otáčení dutinky.

Další otázkou je síla potřebná k přestavení polohy příze a její průběh. V konzervativním silovém poli^[4] podle (1.17) platí, že práce vykonaná polem při pohybu bodu z polohy X_1 do X_2 nezávisí na tvaru dráhy, respektive, že práce vykonaná po uzavřené křivce L je nulová.

$$(1.17) \quad \oint_L F ds = 0$$

Pokud by rozvádění, jako speciální vratný pohyb, probíhalo v konzervativním silovém poli, byla by energie potřebná k rozvádění nulová.

Vlivem disipativních sil ale neplatí rovnost (1.17), práce vykonaná po uzavřené křivce je menší než nula, práce vykonaná disipativními silami je záporná. V praxi to znamená, že při pohybu v tomto poli se kinetická energie tělesa snižuje.

Pokud celý mechanismus rozvádění zjednodušíme na hmotný vodič příze, dostáváme hmotný bod pohybující se po uzavřené křivce. Pro vodič příze platí, že potenciální energie (1.18) vodiče je konstantní, protože se pohybujeme na stejném potenciálu, po horizontále $h = konst.$.

$$(1.18) \quad E_p = m_v g h$$

Kinetická energie v intervalu $(0, L)$ je konstantní podle vztahu (1.19) a to za předpokladu, že rychlost rozvádění je konstantní. Při pohybu ve směru 0 do L je kladná, při směru pohybu z L do 0 je záporná. Díky kvadrátu ovšem je energie konstantní.

$$(1.19) \quad E_k = \frac{1}{2} m_v v_r^2$$

Speciální případ nastává v místě 0 a L, kdy se skokově mění rychlost z v_r na $-v_r$, a kinetická energie klesá k nule.

Pro zjednodušení dalšího popisu budeme uvažovat vliv disipativních sil konstantní v celém rozsahu $\langle 0, L \rangle$. Energii disipativních sil označíme E_d . Práci vnější síly jako E_o . Protože platí zákon zachování energie, musí nutně platit následující vztah.

$$(1.20) \quad E_p + E_k + E_d + E_o = konst.$$

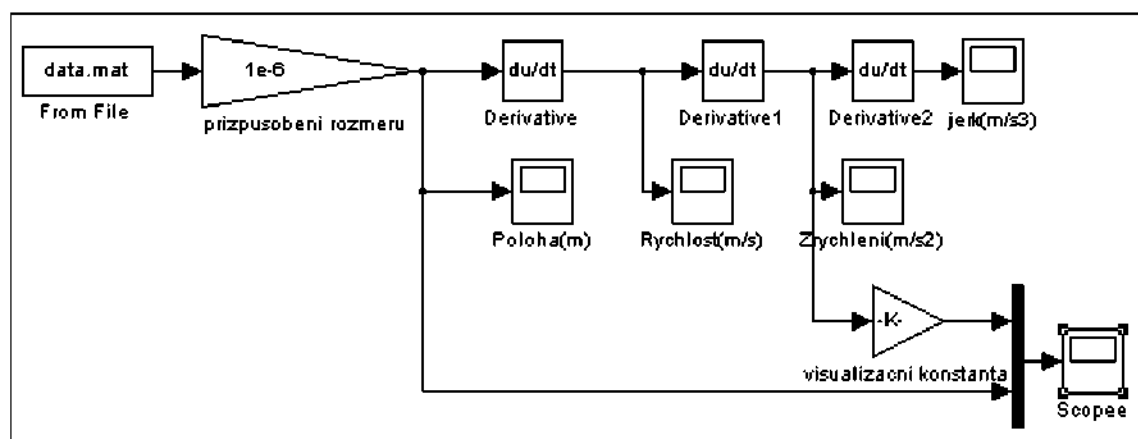
Aby byla rovnost splněna, musí na základě předpokladů platit, že v intervalu $(0,L)$ je energie disipativních sil rovna práci vnějších sil podle

$$(1.21) \quad E_o = E_d$$

Oproti tomu v bodech 0 a L je kinetická energie rovná nule. V úvratích musí vnější síla pokrýt jak disipativní ztráty, tak i absenci kinetické energie podle (1.20). Proto musí platit (1.22).

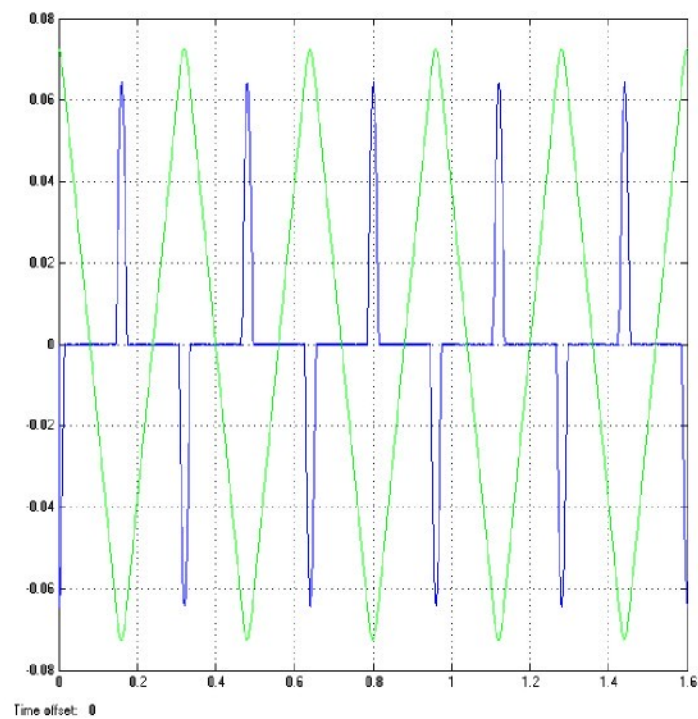
$$(1.22) \quad E_o = E_d + E_k$$

Z rozboru vyplývá, že energie potřebná k zajištění požadovaného průběhu bude v úvratích vyšší a navíc poroste s kvadrátem rychlosti rozvádění v_r . Pokud bychom rekuperovali E_k v úvratích, a při změně směru pohybu ji dodali zpět, platil by i v úvratích vztah (1.22). Celou problematiku lze demonstrovat na jednoduchém matematickém modelu v prostředí Matlab Simulink.



Obr. 1.2 - Model konzervativního silového pole

Pro buzení modelu jsme nemohli použít pilovou funkci polohy, neboť model by vlivem derivací byl nestabilní.



Obr. 1.3 - Průběh zrychlení (modře) při změně směru rozvádění (zeleně) v čase

Z průběhu zrychlení je vidět, že v konzervativním silovém poli je nutné vnější silou působit pouze v úvratích. Zatímco v lineárních úsecích polohy je průběh zrychlení konstantní a rovný nule vlivem zanedbání disipativních sil.

2 Současná řešení rozvádění příze na textilních strojích

Správné rozvádění příze na textilních strojích je možné zajistit několika způsoby. Jednou z možností je využití drážkovaného válce, kužele či bubnu^[9]. Rotací válce kolem jeho osy se mění aktuální poloha drážky vůči dutince cívky. Příze, která je vedena drážkou, je tak rozváděná na dutinku cívky.

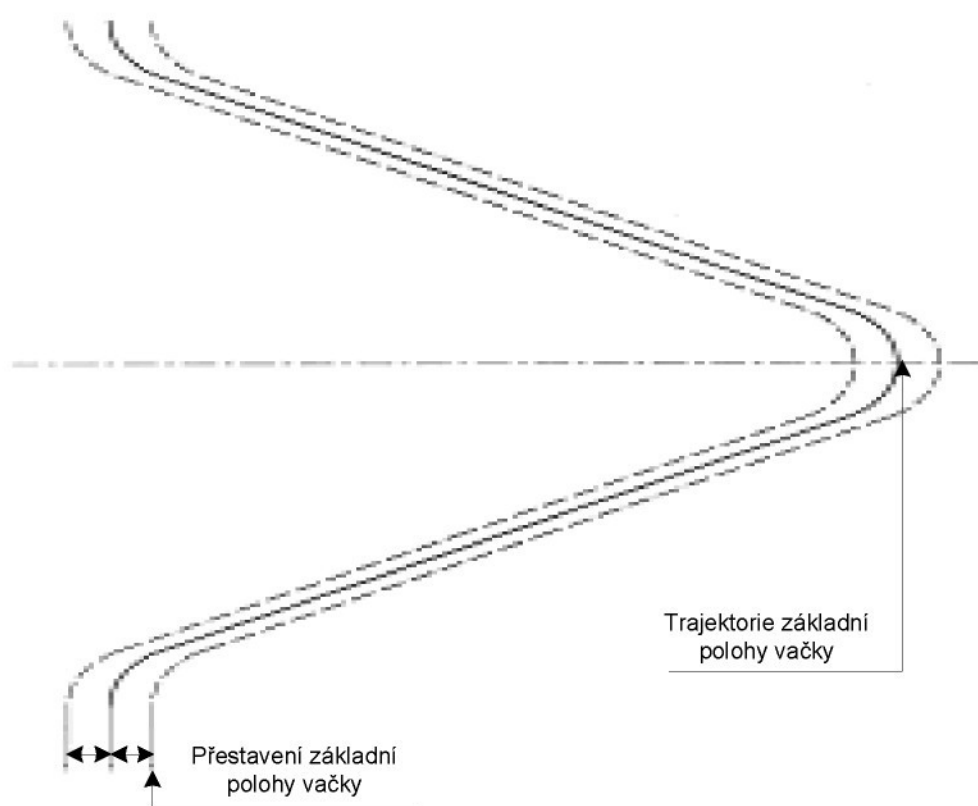
Další z možností je využití hmotného vodiče příze, rozváděcího oka. Poloha oka je periodicky přestavována mechanismem a tím dochází k rozvádění příze. Vlastní zařízení se potom skládá ze surně uložené rozváděcí tyče s vodičí příze, rotačního pohonu a mechanismu, který převádí rotační pohyb na lineární pohyb žádaného průběhu.

Rozváděcí tyč je na svém konci opatřena čepem, který zapadá do drážky v povrchu válce. Drážka tvoří uzavřenou křivku orientovanou od jedné základny válce ke druhé. Otáčením válce dochází k převodu rotačního pohybu válce na posuvný pohyb tyče. Na jednu otáčku válce připadá jedna perioda vratného pohybu, tedy posuvný pohyb tam i zpět.

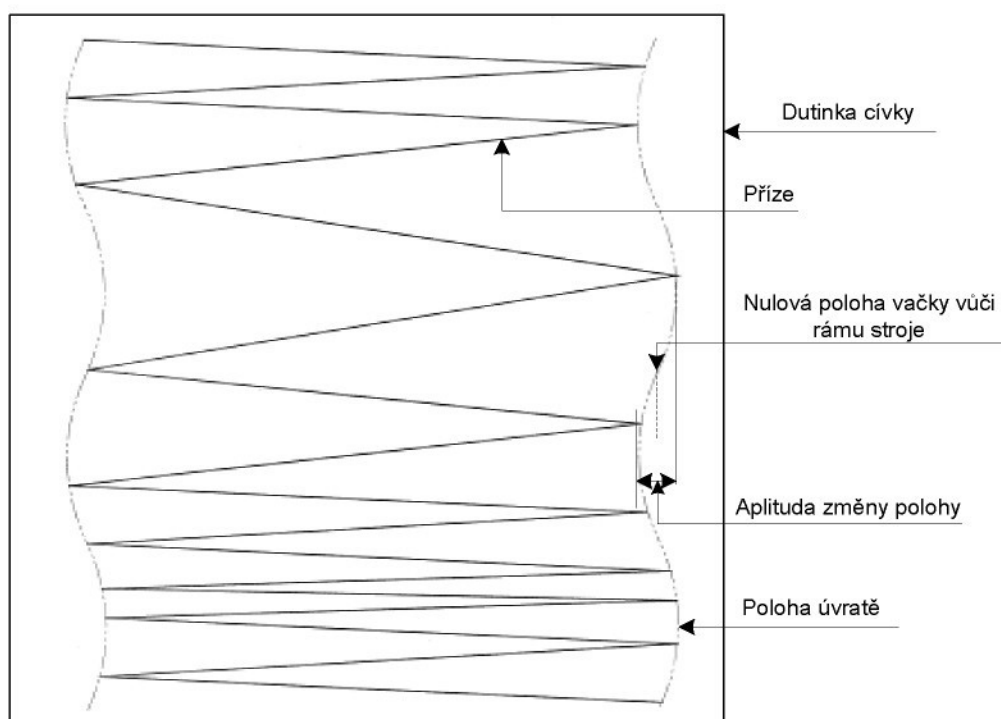
Na stavbu návínů jsou ale kladeny ještě další požadavky nejen rovnoměrné uložení příze na dutinku. Pro další technologické zpracování je nutné zajistit správný úhel křížení návínů. Další požadavek je na kvalitu čel cívky. Důležitým faktorem je rušení pásmových návínů, aby nedocházelo k propadnutí příze do nižší vrstvy návínů. Proto musí být základní rozváděcí pohyb ještě dále modifikován.

Vlastní průběh rozvádění není pouze periodická funkce. Základní poloha drážkového válce je přestavována vůči rámu stroje podle Obr. 2.1 a tím je dosaženo výsledného požadovaného pohybu Obr. 2.2. Výsledná funkce polohy vodiče příze vůči rámu stroje je tedy spíše určena rovnicí (2.1).

$$(2.1) \quad x = g(f(t))$$

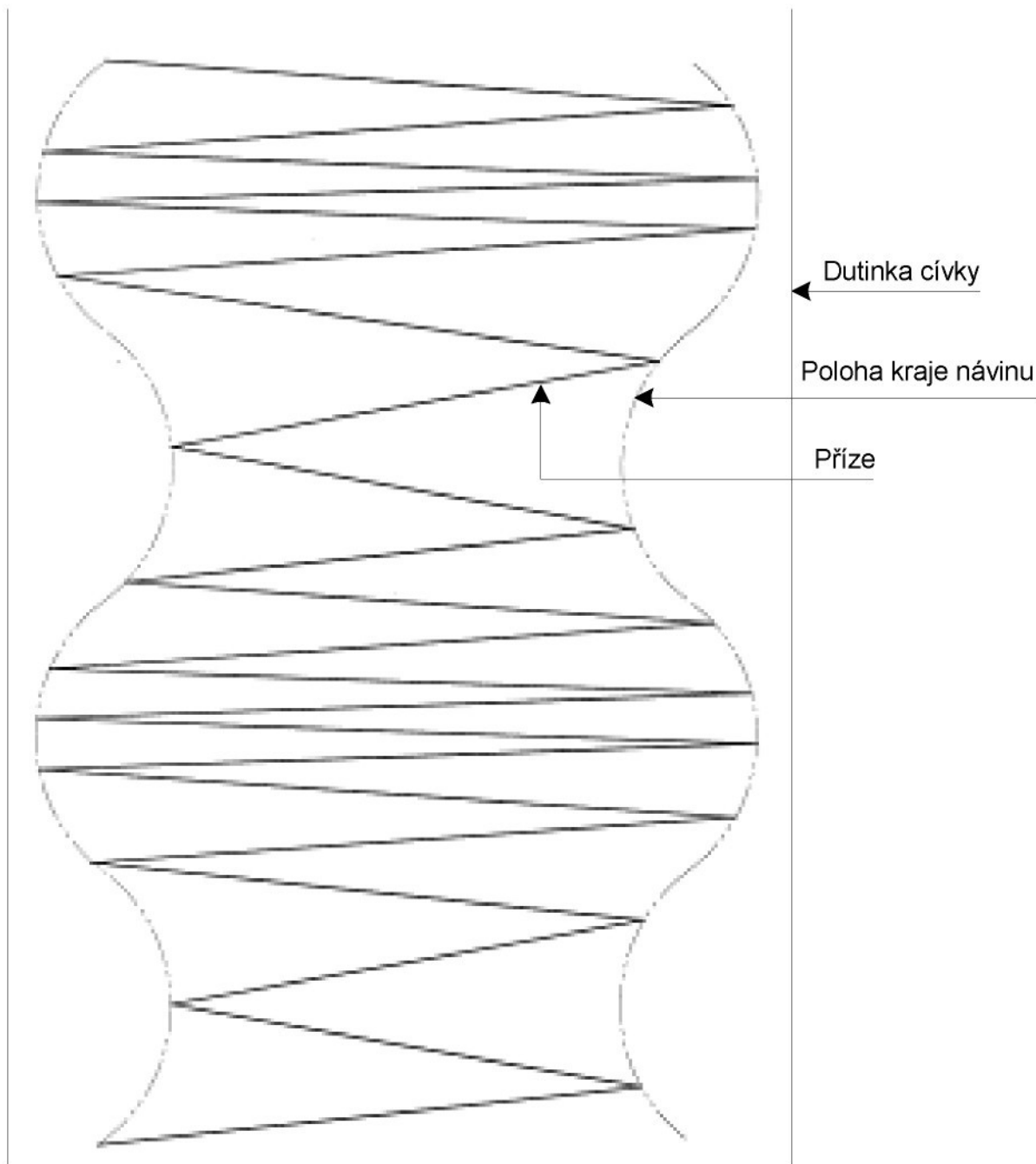


Obr. 2.1 – Základní trajektorie vačky a její posun vůči rámu stroje



Obr. 2.2 – Výsledná trajektorie vodiče příze vůči rámu stroje

Další možností jak docílit rušení pásmových návinů je změna polohy úvratí rozváděcí tyče^[7] podle Obr. 2.3.



Obr. 2.3 – Výsledná trajektorie vodiče příze se zvýrazněnou obálkou při změně úvratí rozváděcí tyče

Realizace trajektorie podle obrázku Obr. 2.3 není při stávajícím mechanickém uspořádání prakticky realizovatelná.

Na dopřádacích strojích řady BT firmy Rieter^[26] je rozvádění realizováno pomocí hmotného vodiče příze. Dopřádací stroj se skládá z jednotlivých míst, kde se zpracovává surovina na přízi. Místa jsou sdružena do společné sekce. Přes sekci prochází rozváděcí tyč, která je kluzně uložena, s vodiči příze. Na hranici dvou sekcí je tyč spojena rozebíratelnou spojkou. Při stavbě stroje se střídají sekce s duralovou tyčí s tyčí kompozitovou, podle požadované délky stroje. To má za cíl snížit hmotnost rozváděcí tyče a zachovat její tuhost. Dopřádací stroj se skládá z hlavní pohonné jednotky a sudého počtu sekcí kvůli osové symetrii. Dopřádací stroj složený z tři sta dvaceti dopřádacích míst sdružených do dvaceti sekcí pak může dosahovat celkové délky řádu čtyřiceti pěti metrů. Rozváděcí tyč je poháněna speciálním mechanismem složeným z axiální vačky a přídavného soustrojí, které přestavuje polohu válce vůči rámu stroje. Přídavný pohyb je mechanicky svázán s drážkovým válcem. Na konci rozváděcí tyče je klíč, který zapadá do drážky. Pro pohon mechanismu se využívá asynchronního pohonu s frekvenčním měničem. Otáčením válce je převáděn rotační pohyb na periodický lineární pohyb rozváděcí tyče a zároveň je přestavována jeho poloha vůči rámu stroje.

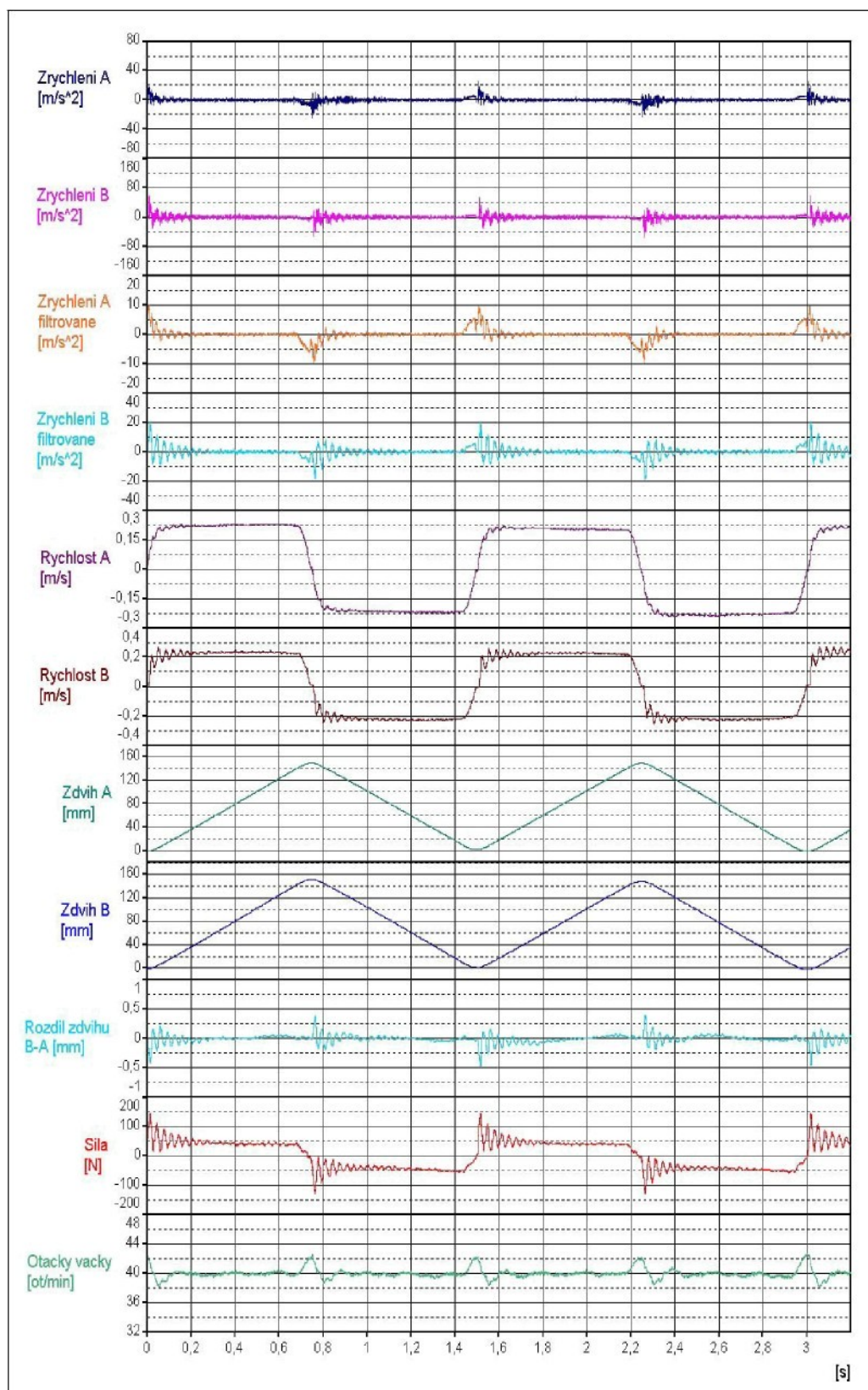
Výhodou této koncepce je využití levného pohonu pro velký počet míst. Případné kolísání otáček se promítne i do přídavného pohybu. Díky mechanické vazbě je tedy zaručena požadovaná trajektorie.

Nevýhodou mechanických systémů je obtížná změna parametrů návinů^[1]. Nastavení šířky návinu, resp. velikosti zdvihu rozváděcí tyče, či rychlosti v jednotlivých úsecích posuvného pohybu se provádí změnou parametrů mechanické vazby. Tedy výměnou drážkového válce.

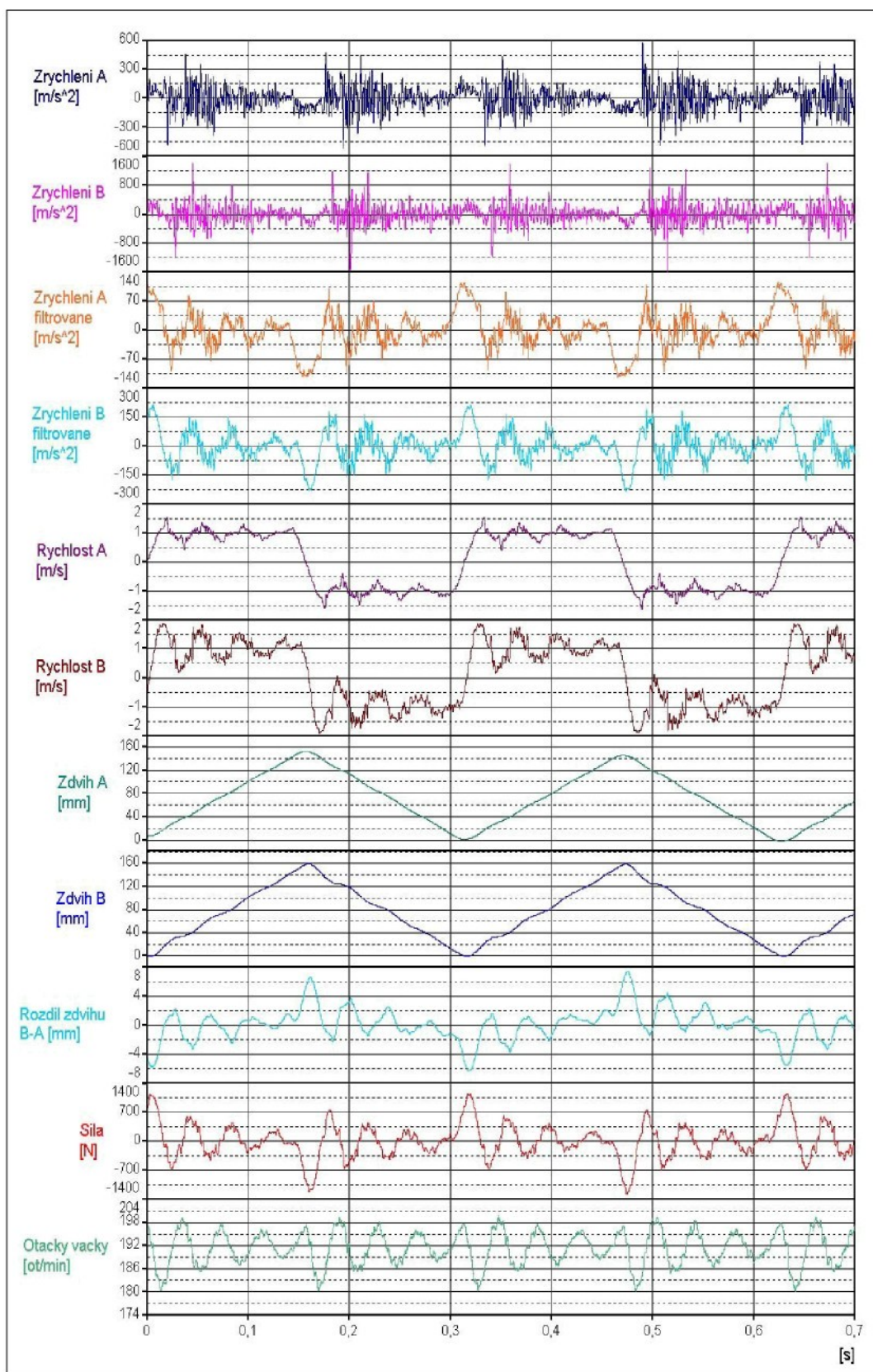
Další problém jsou nevýhodné vlastnosti návinu v místě úvratí vratného pohybu rozváděcí tyče. Pro zlepšení návinu v úvratí se využívají různé pružné elementy. Jejich parametry jsou ale proměnné během jejich omezené životnosti. Kvalita

návinu souvisí s předepsanou trajektorií vačky, omezením maximálního zrychlení a jeho derivace. Toto omezení je předurčeno celkovou mechanickou stavbou stroje.

Při hromadném rozvádění může rozváděcí tyč dosahovat délky řádu desítek metrů. Při využití rozváděcí tyče mají náviny blízko pohonné jednotky jinou stavbu než náviny na vzdáleném konci stroje. Tento jev je zapříčiněn konečnou tuhostí rozváděcí tyče. V úvratích vratného pohybu je totiž požadováno vysoké zrychlení a proto je snahou snížit hmotnost pohybujících se součástí, tedy jak moment setrvačnosti válcové vačky tak i hmotnost rozváděcí tyče. Rozváděcí tyč je členěna do sekcí z různých lehkých materiálů, duralových či kompozitových elementů, které jsou vzájemně spojeny. Při montáži jednotlivých sekcí je obtížné zaručit podélnou souosost jednotlivých elementů, což se projeví také na výsledné tuhosti rozváděcí tyče. Navíc při tlačném pohybu může docházet k přičení rozváděcí tyče. Toto přičení má za následek zvýšení pasivních odporů ve vedení tyče. Popsané problémy jsou dobře patrné z měření na stroji^[18] BT 903 FXL, Graf 2.1 a Graf 2.2.



Graf 2.1 – Průběhy polohy, rychlosti a zrychlení při navíjecí rychlosti 40m/min, na vzdálenějším místě „B“ jsou patrné oscilace způsobené mechanickou tuhostí rozváděcí tyče, v průběhu síly v tyči jsou dobře patrné špičky při změně směru pohybu



Graf 2.2 - Průběhy polohy, rychlosti a zrychlení při navíjení rychlosti 200m/min, výrazné zhoršení kinematických a dynamických poměrů v tyči, nárůst síly v tyči a výrazné oscilace v průběhu rychlosti

zrychlení A	10	ms^{-2}
zrychlení B	10	ms^{-2}
síla v tyči	150	N
rozváděcí rychlost	0,25	m/s
navíjecí rychlost	40	m/min

Tab. 2.1 - Shrnutí naměřených hodnot pro navíjecí rychlost 40m/min

Při nízké navíjecí rychlosti je vidět, že pružné chování tyče se prakticky neuplatní. Při přechodech z kladného smyslu pohybu do záporného a zpět je patrný nárůst zrychlení. To je způsobené ostrým přechodem vačky. Po tomto přechodu je vidět zatlumené kmitání způsobené pružným chováním tyče. Nicméně zrychlení jak v místě A, blízko pohonné jednotky, tak v místě B, na odlehlém konci tyče mají stejnou hodnotu. V průběhu rychlosti na vzdáleném konci B jsou patrné pouze pomaleji zatlumené kmity než v místě A. V průběhu polohy nejsou patrné oscilace.

Při vysokých navíjecích rychlostech je chování odlehlého místa tyče B odlišné od místa u pohonné jednotky A. Zrychlení v místě B dosahuje dvojnásobných hodnot oproti místě A. Při změně smyslu pohybu roste síla v tyči až na hodnoty $\sim kN$.

zrychlení A	110	ms^{-2}
zrychlení B	225	ms^{-2}
síla v tyči	1100	N
rozváděcí rychlost	1	m/s
navíjecí rychlost	200	m/min

Tab. 2.2 - Shrnutí naměřených hodnot pro navíjecí rychlost 200m/min

Z měření jasně vyplývá, že s rostoucí navíjecí rychlostí a tedy s rostoucí posuvnou rychlostí tyče se výrazně projevují její parazitní vlastnosti. Dochází k jejímu kmitání a deformacím, zejména při změně směru pohybu. To je dobře patrné ze zatlumeně kmitavého průběhu rychlosti.

3 Identifikace systému rozváděcí tyče

Nové možnosti řešení rozvádění je možné nalézt, budeme-li na celou sestavu pohlížet jako na mechatronický systém. To znamená, že budeme komplexně řešit elektrickou, mechanickou a elektronickou část v jejich přímé návaznosti.

Při řešení modelu rozváděcí tyče jsme vyšli z naměřených dat na rozváděcí tyči při navíjecí rychlosti $200m/min$, Graf 2.2 a Tab. 2.2. Z oscilací rychlosti změřené v místě „A“, tedy na bližším konci tyče, jsme odečetli amplitudu a periodu kmitů. Pro výpočet tuhosti tyče a tlumení^[5] jsme vyšli z mechanické rovnice (3.1).

$$(3.1) \quad m\ddot{x} + k\dot{x} + cx = u(t)$$

zkrácením celé rovnice m a zavedením konstant (3.2) a (3.3),

$$(3.2) \quad 2N = \frac{k}{m}$$

$$(3.3) \quad \Omega^2 = \frac{c}{m}$$

dostáváme rovnici ve tvaru (3.4).

$$(3.4) \quad \ddot{x} + 2N\dot{x} + \Omega^2 x = u(t)$$

Řešením charakteristické rovnice, rovnice (3.4) ve tvaru (3.5)

$$(3.5) \quad \lambda^2 + 2N\lambda + \Omega^2 = 0$$

dostáváme vlastní čísla (3.6).

$$(3.6) \quad \lambda_{1,2} = -N \pm \sqrt{N^2 - \Omega^2}$$

Při řešení mohou nastat tři základní stavy $N > \Omega$, tedy $\delta = \frac{N}{\Omega} > 1$ vlastní čísla

jsou reálná, při $N = \Omega$, tedy $\delta = \frac{N}{\Omega} = 1$ řešením je jedno vlastní dvojnásobné číslo a při

$N < \Omega$ jsou vlastní čísla komplexně sdružená, což je případ podkritického tlumení $\delta < 1$. Vlastní čísla pak získáme ve tvaru (3.7),

$$(3.7) \quad \lambda_{1,2} = -N \pm i\Omega_1$$

kde Ω_1 je frekvence tlumených kmitů určená vztahem (3.8).

$$(3.8) \quad \Omega_1^2 = \Omega^2 - N^2$$

Řešení diferenciální rovnice potom hledáme ve tvaru (3.9)

$$(3.9) \quad x = e^{-Nt} c \sin(\Omega_1 t + \varphi_0)$$

Ze vztahu pro poměr dvou amplitud (3.10)

$$(3.10) \quad \frac{x(t+nT)}{x(t)} = \frac{c \cdot e^{-N(t+nT)} \sin(\Omega_1(t+nT) + \varphi_0)}{c \cdot e^{-Nt} \sin(\Omega_1 t + \varphi_0)} = e^{-NnT}$$

kde pro $n=1$ pro sobě jdoucí amplitudy a za využití zjednodušujícího předpokladu, že $\Omega \gg N$ tedy $\Omega_1 = \Omega$, dostáváme rovnici (3.11).

$$(3.11) \quad \ln \frac{x(t)}{x(t+T)} = NT = konst.$$

V našem případě jsme odečetli z naměřených hodnot jak hodnoty $x(0)$, $x(1)$, tak i časy $t(0)$ a $t(1)$, jejichž odečtením jsme získali T a po dosazení a numerickém výpočtu dostáváme, že $f_1 = 29,24$ [Hz], koeficient $N = 3,03$ [N.m/kg-1], tuhost pružiny pomocí vztahu (3.12).

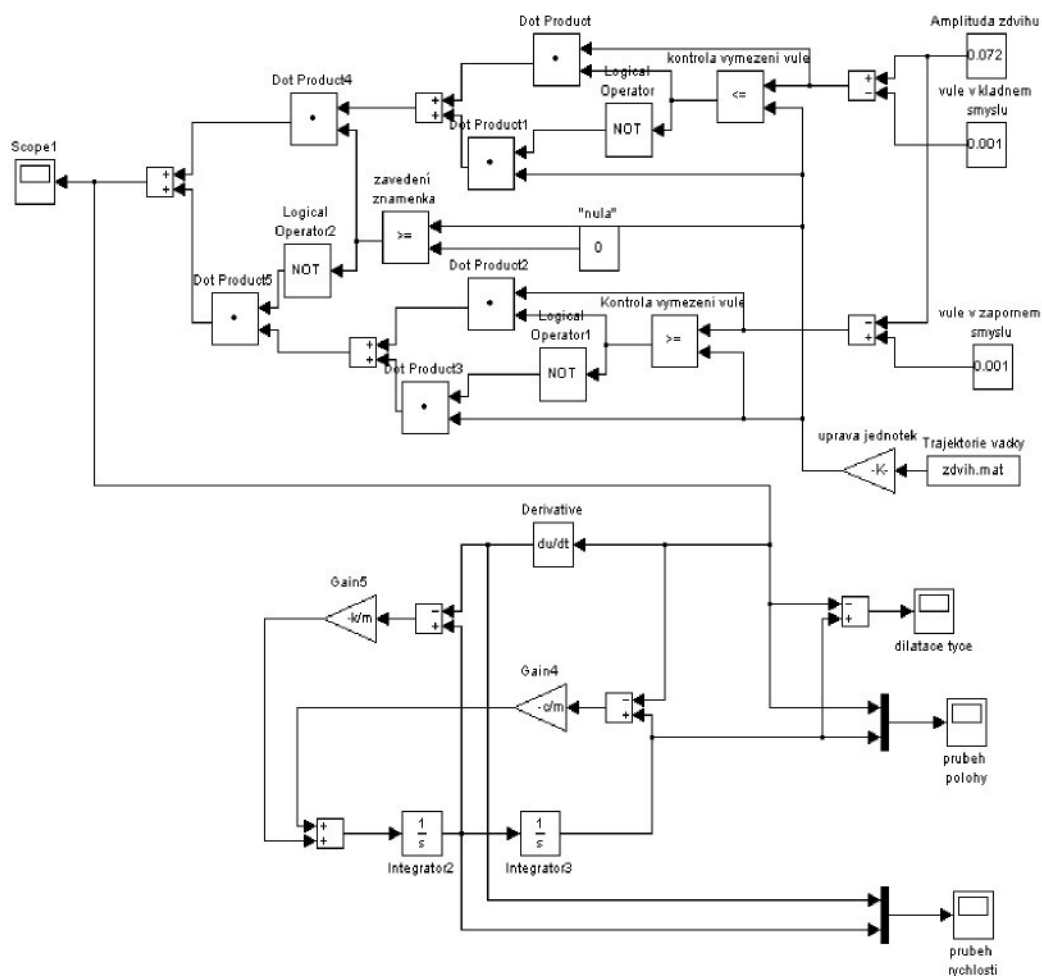
$$(3.12) \quad c = m \cdot \Omega^2$$

$c = 228336,49 \text{ [Nm-1]}$, kde za m jsme dosadili $6,77 \text{ kg}$, což odpovídá hmotnosti tyče bez hnacího ústrojí nejdelší verze stroje složeného z dvaceti sekcí, a koeficient tlumení pomocí vztahu (3.13).

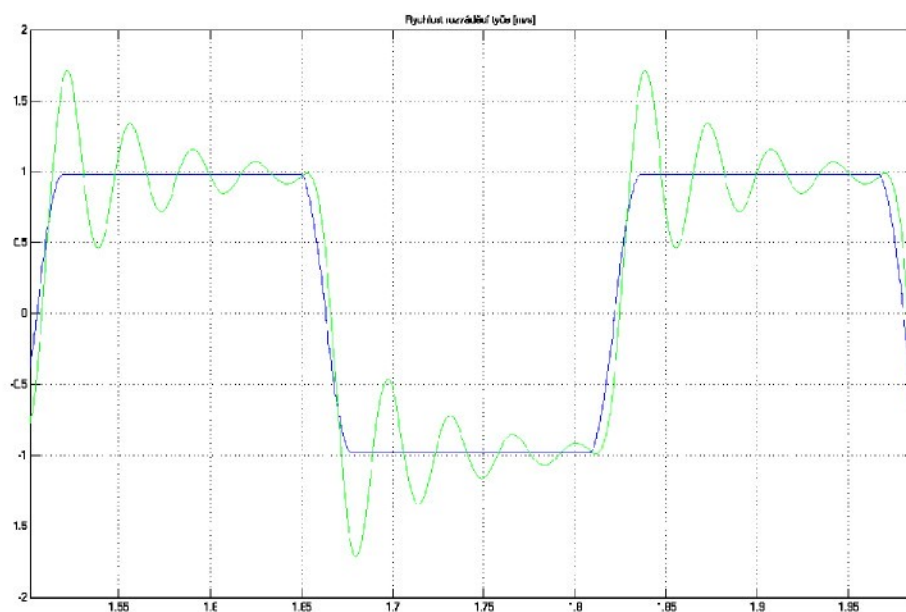
$$(3.13) \quad k = \frac{\ln 2}{\pi} \sqrt{c \cdot m}$$

$k = 274,22 \text{ [Nsm-1]}$ a konečně koeficient poměrného tlumení $\delta = 0,0165$.

Na základě vypočtených parametrů tuhosti a tlumení byl sestaven matematický model, Obr. 3.1, kde celá tyč byla nahrazena jedním hmotným bodem na pružině a tlumiči. Jako buzení modelu jsme využili předepsané funkce trajektorie vačky.

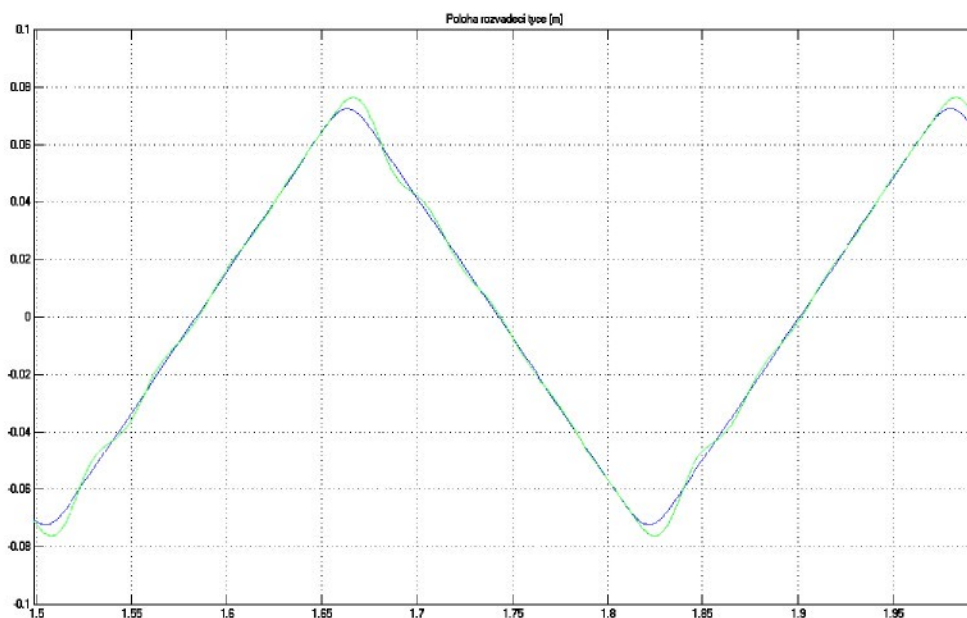


Obr. 3.1 - Simulační schéma modelu tyče zahrnující vliv vůlí



Graf 3.1 – Rychlost rozváděcí tyče v závislosti na čase

Modrý průběh v grafu, Graf 3.1, znázorňuje předepsanou rychlost rozváděcí tyče. V zeleném jsou dobře patrné oscilace způsobené konečnou tuhostí rozváděcí tyče.

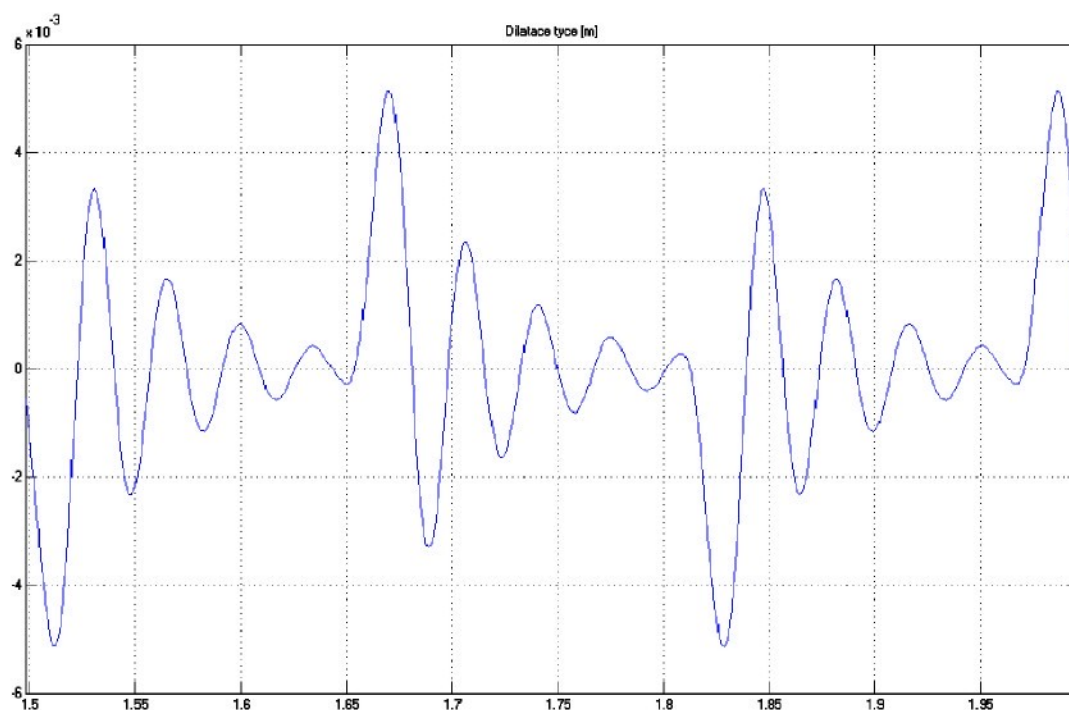


Graf 3.2 – Průběh polohy tyče v čase

Modrý průběh v grafu, Graf 3.2, je předepsaná poloha vačky, zelený je modelovaný průběh polohy rozváděcí tyče konečnou tuhostí.

Identifikaci pomocí logaritmického dekrementu jsme provedli i pro vzdálenější konec rozváděcí tyče. Zde jsme dostali hodnoty $f_1=27,78 [Hz]$, koeficient $N=3,16 [N.m^{-1}kg^{-1}]$, tuhost pružiny $c=206077 [Nm^{-1}]$ a koeficient tlumení $k=260.508 [Nsm^{-1}]$ koeficient poměrného tlumení $\delta = 0,0181$.

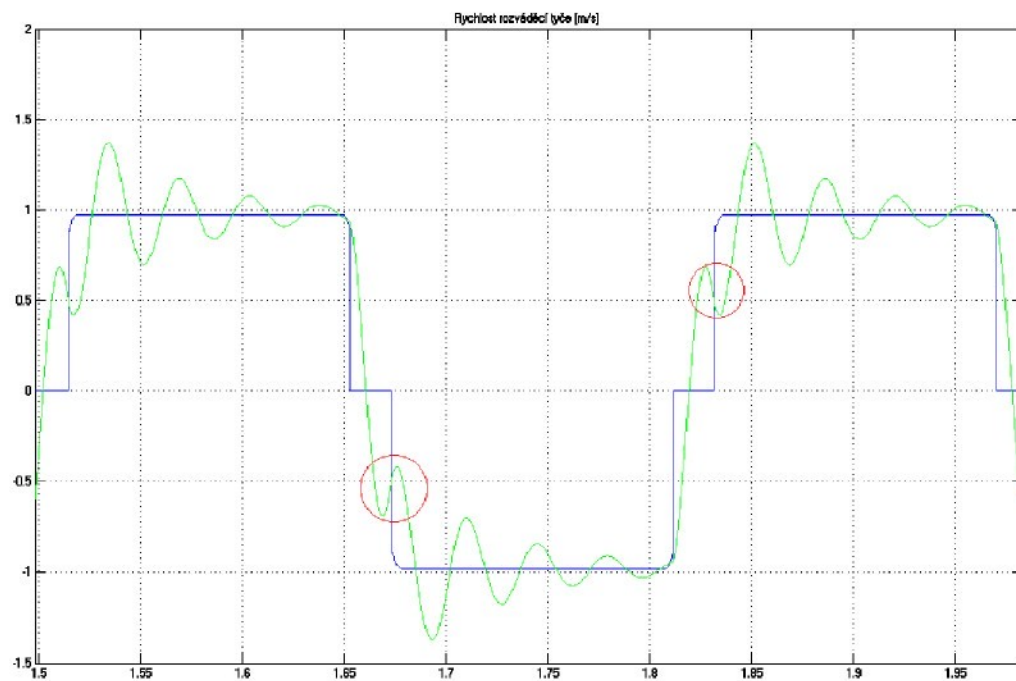
V místě B je tuhost tyče nižší, což odpovídá teoretickým předpokladům. Simulované hodnoty odpovídají naměřeným průběhům.



Graf 3.3 – Dilatace tyče (rozdíl polohy vzdálenějšího konce tyče a požadované hodnoty)

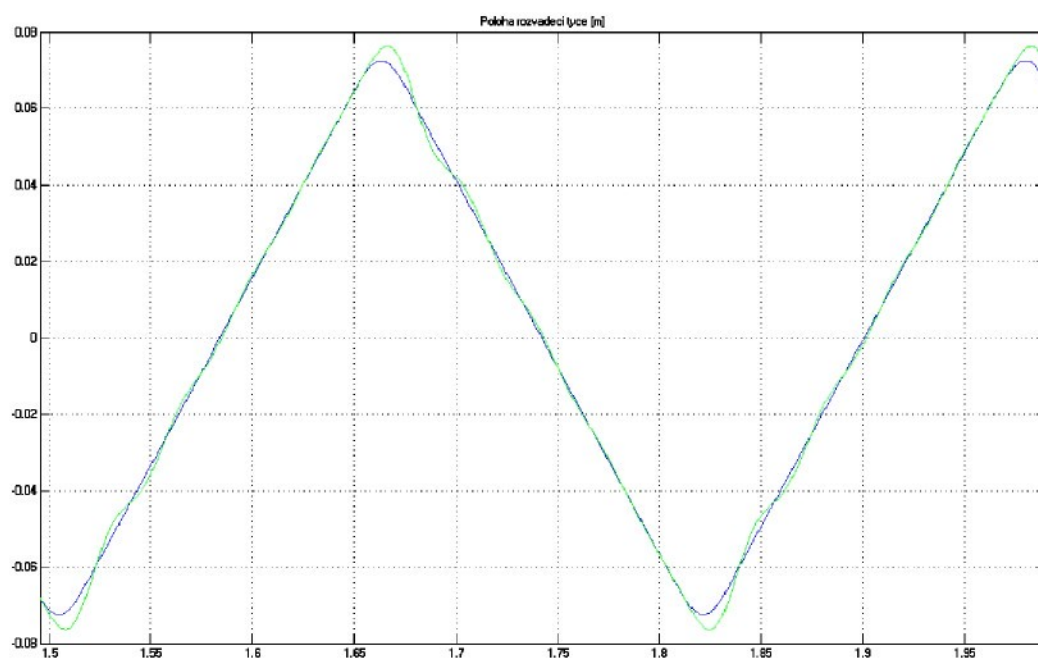
Při kmitavém pohybu rozváděcí tyče dochází vlivem vlastní tuhosti ke zpoždění aktuální polohy vzdálenějšího konce vůči aktuální poloze vačky. Tento rozdíl je vynesena v grafu, Graf 3.3.

Rovněž byl prověřen vliv vůli na hnacím mechanismu a to v několika krocích. Simulační schéma dovoluje zadat odlišnou vůli při přechodu z kladného směru do záporného a naopak.

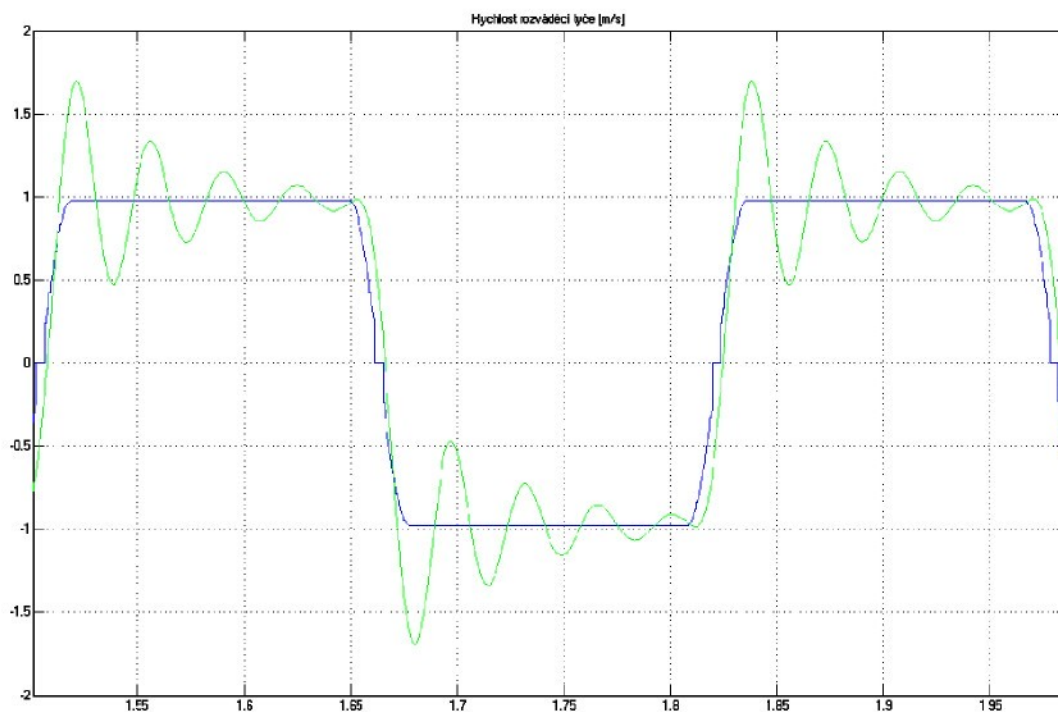


Graf 3.4 - Průběh rychlosti s vůlí ve hnacím mechanismu $\pm 5\text{mm}$ (demonstrační případ)

Jak v náběžné tak v sestupné hraně průběhu rychlosti, Graf 3.4, je patrný zákmit vlivem vůle hnacího mechanismu. Modrý průběh demonstruje vůle v průběhu požadované rychlosti.



Graf 3.5 - Závislost polohy mechanismu s vůlí ve hnacím mechanismu $\pm 0.02\text{mm}$ na čase



Graf 3.6 - Závislost rychlosti s vůlí ve hnacím mechanismu $\pm 0.02\text{mm}$ na čase

Vliv vůlí se při modelování chování tyče projeví pouze nepatrně. To je způsobeno poměrně vysokým zatlumením systému. Parazitní zákmity jsou dobře patrné zejména v průběhu rychlosti při vůli v řádu milimetrů, Graf 3.4, což je pouze experimentální případ.

Vstupní parametry (odečteno v bode "A"):

$$x0 := 1.5:45 \quad t0 := 0.0198$$

$$x1 := 1.3652 \quad t1 := 0.054 \quad m := 6.765$$

$$T := t1 - t0 \quad N := \frac{1}{T} \ln\left(\frac{x0}{x1}\right) \quad \Omega1 := \frac{2 \cdot \pi}{T} \quad c := \Omega1^2 \cdot m \quad k := \frac{\sqrt{c \cdot m \cdot \ln 2}}{\pi}$$

$$f := \frac{1}{T} \quad \delta := \frac{N}{\Omega1}$$

$$f \rightarrow 29.239766081871345029$$

$$T \rightarrow 3.42 \cdot 10^{-2}$$

$$N \rightarrow 3.0346319717760238576$$

$$c \rightarrow 228336.49256456912054$$

$$k \rightarrow 274.21875278947368421$$

$$\delta \rightarrow 1.6517802411875008149 \cdot 10^{-2}$$

Vstupní parametry (odečteno v bode "B"):

$$x0 := 1.86 \quad t0 := 0.015$$

$$x1 := 1.66 \quad t1 := 0.051 \quad m := 6.765$$

$$T := t1 - t0 \quad N := \frac{1}{T} \ln\left(\frac{x0}{x1}\right) \quad \Omega1 := \frac{2 \cdot \pi}{T} \quad c := \Omega1^2 \cdot m \quad k = \frac{\sqrt{c \cdot m \cdot \ln 2}}{\pi}$$

$$f := \frac{1}{T} \quad \delta := \frac{N}{\Omega1}$$

$$f \rightarrow 27.777777777777777$$

$$T \rightarrow 3.6 \cdot 10^{-2}$$

$$N \rightarrow 3.1599690376849448292$$

$$c \rightarrow 206073.68453952363129$$

$$k \rightarrow 260.50781514959999999$$

$$\delta \rightarrow 1.8105288922772292339 \cdot 10^{-2}$$

Obr. 3.2– Ověření výpočtu pomocí matematického softwaru

Vlastní frekvence se blíží naměřené frekvenci kmitů na tyči. V modelu se neprojeví další vlastní frekvence rozváděcí tyče, neboť ta je nahrazena jen jednohmotovým systémem. Pokud tuhost tyče vynásobíme posunutím, dostáváme hodnotu zatěžující síly. Tato síla také odpovídá naměřeným hodnotám.

Pro zpřesnění modelu by bylo nutné rozdělit tyč na několik sekcí. Stávající model je ale již použitelný pro modelování zátěže elektrodynamického pohonu. Výpočet jsme ověřili pomocí numerického softwaru podle Obr. 3.2 .

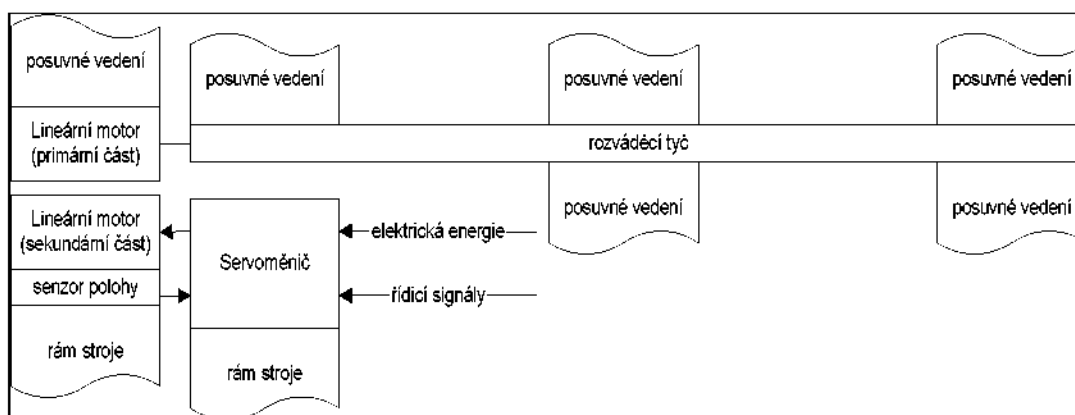
4 Nové možnosti řešení pohonu rozvádění

Koncepce modernizace rozvádění lze rozdělit do dvou základních směrů. První z nich se snaží využít společného pohonu pro více doprřadacích míst, sekci nebo až jednu stranu stroje. Je to koncepce skupinového rozvádění.

Individuální rozvádění řeší polohování příze v rámci jediného místa. Výhodou skupinového rozvádění je malá cena pohonu na jedno rozváděcí místo, oproti tomu individuální rozvádění umožňuje docílit vyšší kvalitu náviny. Cena pohonu na jedno rozváděcí místo je ale vyšší než v případě skupinového rozvádění.

4.1 Modernizace skupinového rozvádění

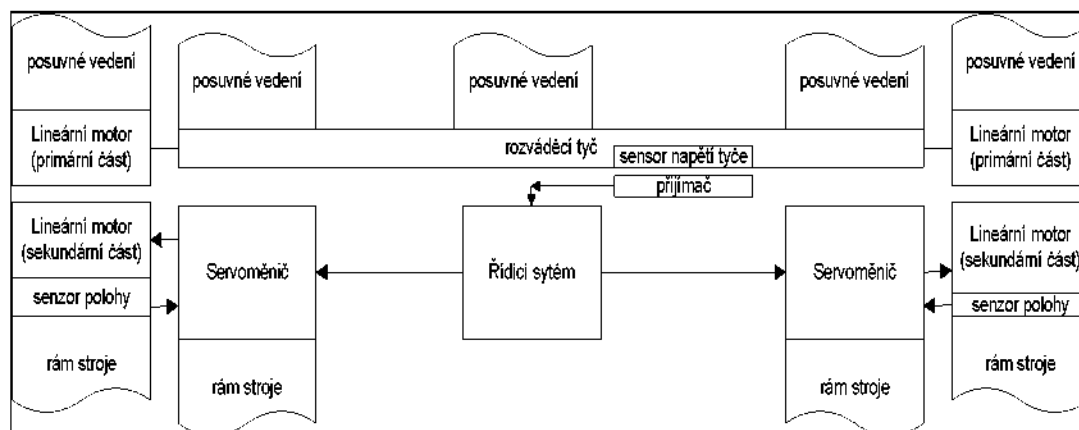
Jednou z možností jak modernizovat pohon rozvádění je využití lineárního pohonu^[8]. Předpokládá se nasazení lineárního pohonu jako náhrady rotačního pohonu a mechanismu s drážkovým válcem. Lineární pohon by opět poháněl rozváděcí tyč s vodiči příze.



Obr. 4.1 – Modernizace stávající koncepce stroje pomocí lineárního pohonu

Tento způsob modernizace by umožnil snadnou změnu parametrů náviny pomocí řídících signálů, ale neodstranil by vliv rozváděcí tyče. Návinu na hnaném a volném konci by měly různé vlastnosti.

Další dva způsoby modernizace předpokládají nasazení lineárních motorů na obou stranách tyče^[1].



Obr. 4.2 - Modernizace stávající koncepce stroje pomocí lineárního pohonu

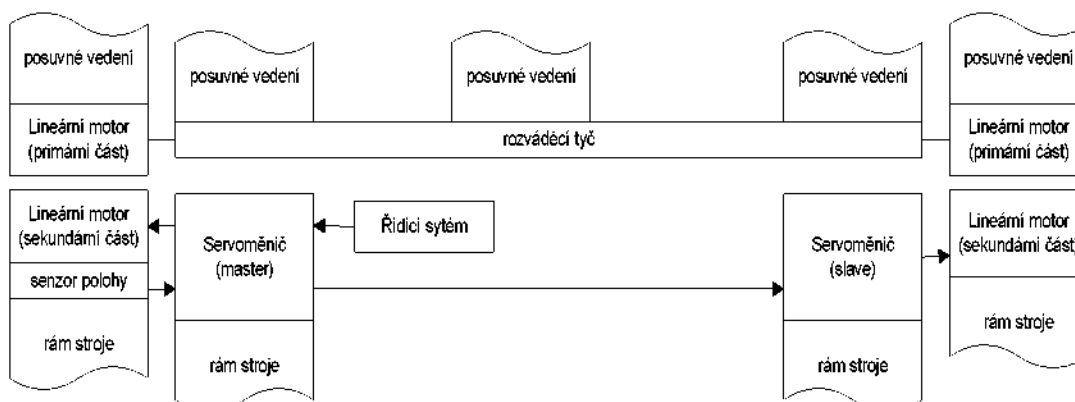
První způsob využívá dvou samostatných lineárních pohonů s tím, že oba jsou řízené z nadřazeného systému, do kterého vstupuje signál ze senzoru napětí tyče. Na základě požadované polohy a hodnoty napětí tyče jsou oba pohony řízeny autonomně tak, aby převládající zatížení bylo vždy tahové. Tím se odstraní problémy s přičením rozváděcí tyče.



Obr. 4.3 - Možné uspořádání senzoru napětí tyče

Přenos energie do senzoru by se dal řešit pomocí fotovoltického článku, nebo pomocí transformátoru. Výstupní signál ze senzoru by byl přenášen pomocí infra či laserové diody a dekován polem detekčních diod.

Druhý způsob je jednodušší a využívá master-slave režimu u lineárních pohonů.



Obr. 4.4 - Využití master/slave režimu lineárního pohonu

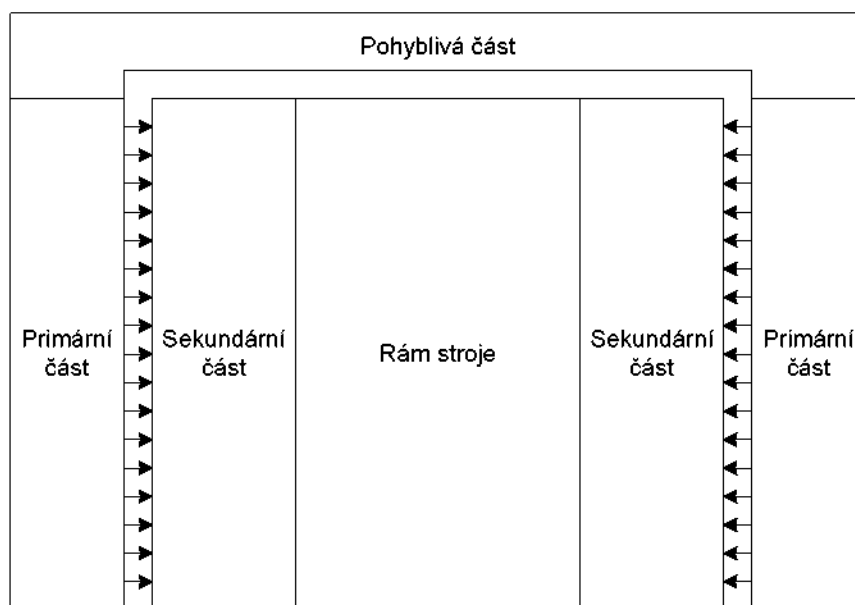
V inicializační části by pohony fungovali autonomně. „Master pohon“ by byl zaparkován a na „Slave“ pohonu bychom omezili maximální proud. Po tomto omezení bychom emulovali na vstupu polohového senzoru na levou krajní polohu, zatímco žádaná poloha by byla zadána na pravou krajní polohu. Motor by se tedy rozjel vpravo, ale s omezeným momentem. Výsledkem by bylo předeptnutí rozváděcí tyče a vymezení vůlí. Po krátkém čase, řádově desítek milisekund, by byla aktuální poloha zapamatována a pohon zaparkován v této poloze. Poté by byly pohony nakonfigurovány řídicím systémem do režimu master/slave a upraven maximální proud na slave pohonu. Dále by pohony pracovaly synchronizovaně v master/slave pohonu. Využívali bychom prvotního předeptnutí. Výhodou tohoto uspořádání je využití pouze jednoho čidla polohy a odstranění senzoru napětí tyče. Pokud by se ale změnila celková délka tyče, například vlivem teplotní dilatace, změnilo by se i předpětí tyče. Bylo by tedy nutné inicializační část po určité době opakovat.

Při stávajícím mechanickém řešení je potřebné pohybovat značnou setrvačnou hmotou. Další přírůstek setrvačné hmoty je vlastní primární část lineárního pohonu. Válcová vačka v současné době slouží jako setrvačník a také jako převodovka snižující vliv zátěže na rotační pohon. Jejím odstraněním bude zátěžná síla působit přímo na primární část lineárního pohonu.

Modernizovat pohon rozvádění konvenčními rotačními pohony je možné při náhradě válcové vačky kuličkovým šroubem. Tato sestava by dovolovala elektronickou parametrizaci, ale kuličkový šroub by měl vyšší moment setrvačnosti než speciální válcová vačka a navíc by pohon rotačního pohybu bylo nutno reverzovat. To by přineslo malou dynamiku v úvratích pohybu a analogické problémy se stávajícím stavem. Proto je řešení s konvenčními rotačními pohony nevhodné.

4.1.1 Dimenzování lineárního pohonu

Při návrhu pohonu vycházíme z předpokládaného paralelního chodu v takzvaném portálovém, gantry^[15], uspořádání Obr. 4.5. Toto uspořádání má za výhodu kompenzaci přitažlivých sil mezi primární a sekundární částí motoru. Primární část lineární motoru je tvořena vinutími jednotlivých fází a magnetickým obvodem. Sekundární část je ocelový pás se segmenty z permanentních magnetů. Sekundární část má v porovnání s primární částí vyšší hmotnost, proto se montuje na rám stroje, zatímco lehčí primární je pohyblivá pro docílení vyšší dynamiky pohonu.



Obr. 4.5 - Portálové "gantry" uspořádání eliminující přitažlivé síly mezi primární a sekundární částí lineárního motoru

Mezi primární a sekundární částí působí přitažlivá síla, díky portálovému uspořádání je ovšem přitažlivá síla dvou jednotek vzájemně kompenzována.

Díky kompenzaci přitažlivé síly, řádově tisíců Newtonů, je snazší navrhnout lineární vedení, které je zatěžováno pouze tíhovou silou motorů, řádově desítky Newtonů.

Pro dimenzování lineárního pohonu potřebujeme základní vstupní údaje odečtené z grafu, Graf 2.2.

vstupní parametry	
trvalá síla:Fc [N]	150
špičková síla:Fp [N]	1400
doba špičky:tp [s]	0,03
doba cyklu : T[s]	0,3
zdvih: l[m]	0,148
požadované zrychlení:a [ms-2]	100

Tab. 4.1 - Základní vstupní parametry návrhu lineárního pohonu^[18]

Ze základních parametrů dopočítáme rychlost pohybu a dobu trvání trvalé síly.

$$(4.1) \quad v = \frac{2 \cdot l}{T}$$

$$(4.2) \quad tc = T - tp$$

dopočítané parametry	
rychlost v(m/s):	0,99
doba trvalé síly:tc[s]	0,27

Tab. 4.2 – Dopočítané vstupní parametry pro návrh lineárního pohonu

Na základě špičkové síly jsme vybrali primární část lineárního pohonu LSP040L, díky portálovému uspořádání je možné oba motory napájet z jednoho měniče HDS032.2-W100N. Výběr důležitých parametrů^[15] je uveden v tabulce Tab. 2.1.

vybrané parametry

Max síla: F_m [N]	1200
Nominální síla: F_n [N]	360
Max proud: I_m [A]	40
Nominální proud: I_n [A]	7,8
Silová konstanta: K_f [N/A]	46
Hmotnost primární části: m_p [kg]	4,7
Hmotnost sekundární části: m_s [kg/m]	8

Tab. 4.3 - Výběr parametrů primární části lineárního pohonu

Ověříme dimenzování pohonu na maximální sílu podle (4.3), kde první člen je síla nutná k polohování vlastní hmoty primární části pohonu a druhý člen má význam maximální zátěžné síly. Násobky dvou jsou ve vzorcích díky portálovému uspořádání, tedy předpokládané instalace dvou primárních částí a jejich paralelnímu chodu.

$$(4.3) \quad 2 \cdot F_m < 2 \cdot m_p \cdot a + F_p$$

Po splnění nerovnice pokračujeme v dalším návrhu výpočtem trvalé hodnoty proudu s využitím silové konstanty podle vztahu. Celková síla se nám dělí mezi dvě primární části podle (4.4).

$$(4.4) \quad I_c = \frac{\frac{1}{2} F_c}{K_f}$$

Dále vypočteme střední hodnotu proudu. Protože proudová špička se opakuje dvakrát za periodu a má tvar trojúhelníku, můžeme při výpočtu využít zjednodušeného vztahu (4.5).

$$(4.5) \quad I = \frac{2 \cdot \frac{I_m \cdot t_p}{2} + I_c \cdot t_c}{T}$$

Po dosazení vychází střední hodnota trvalého proudu $1,63A$ a špičková hodnota proudu $5,47A$. Celkový ztrátový výkon určíme z rovnice (4.6). Tento výkon musíme odvést prostřednictvím chladicího média. Ztrátový výkon jedné primární části činí přibližně 240W.

$$(4.6) \quad P_z = \left(\frac{I}{I_n} \right)^2 \cdot P_{vn}$$

Zbývá určit účinnost celého motoru jako podíl mechanické a celkové energie podle (4.7). Celková účinnost motoru se blíží 0,51.

$$(4.7) \quad \eta = \frac{2 \cdot I \cdot K_f \cdot v}{2 \cdot I \cdot K_f \cdot v + 2 \cdot P_z}$$

Pro určení délky sekundární části (4.8) sečteme požadovaný zdvih a délku primární části pohonu.

$$(4.8) \quad l_s = l_p + l_m$$

Zbývá vyřešit chlazení motoru. Maximální dovolené oteplení vinutí určíme podle (4.9) jako rozdíl maximální teploty vinutí a teploty vstupní chladicí kapaliny, kterou volíme 30 °C.

$$(4.9) \quad t_{wgm} = 155 - t_{co}$$

Výsledné oteplení vinutí určíme dle (4.10) jako součin „využití motoru“ a maximálního dovoleného oteplení.

$$(4.10) \quad \vartheta_w = \left(\frac{I}{I_n} \right)^2 \cdot t_{wgm}$$

Skutečnou teplotu motoru určíme podle (4.11). Ta je potom rovna součtu teploty vstupní chladicí kapaliny a oteplení vinutí a blíží se 92 °C.

$$(4.11) \quad t_{abs} = \vartheta_w + t_{co}$$

Zbývá určit minimální objemový tok chladicí kapaliny o tepelné kapacitě $c = 4183 \text{ Jkg-1K-1}$ a hustotě $\rho = 998,3 \text{ kgm-3}$. Hmotnostní tok určíme podle vztahu (4.12), kde konstanta tři představuje rozdíl teplot chladiva a povrchu chladicího okruhu. Tato hodnota by neměla být překročena s ohledem na deformace primární části. Výsledný požadovaný tok na jednu primární část je $Q = 0,48 \text{ l/min}$ tedy $0,96 \text{ l/min}$ celkově.

$$(4.12) \quad Q = \frac{Pz \cdot 25200}{c \cdot \rho \cdot 3}$$

Pokud bychom uvažovali chlazení vzduchem $c = 1007 \text{ Jkg-1K-1}$ a hustotě $\rho = 1,188 \text{ kgm-3}$, vychází hmotnostní tok $Q = 1690 \text{ l/min}$. Ztrátový tlak na motoru při průtoku Q určíme z rovnice (4.13) a je v případě vodního chlazení roven $\Delta p = 276,8 \text{ Pa}$.

$$(4.13) \quad \Delta p = 10^5 \cdot kdp \cdot Q^{1.75}$$

Návrh motoru odpovídá reálnému stavu a je tedy správný. V současné době pohání rozváděcí tyč rotační pohon s výkonem $0,75 \text{ kW}$, zatímco lineární motor poskytuje výkon přibližně 500 W . Bohužel, vzhledem k nižší účinnosti lineárního pohonu vlivem jeho provozního stavu, vychází instalovaný výkon $1,17 \text{ kW}$. Skupinové rozvádění pomocí lineárního pohonu je tedy technicky realizovatelné, ale lineární pohony v tomto případě dosahují špatné účinnosti. Zlepšení by přineslo účinnější využití rekuperace energie do stejnosměrného meziobvodu pohonu. To však vyžaduje vysokou hodnotu akumulacních prvků.

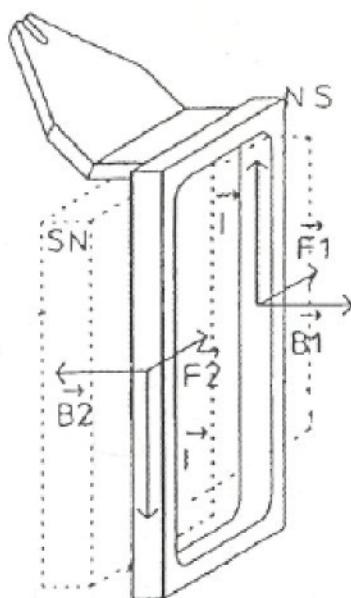
4.2 Možnosti individuálního rozvádění

Prakticky všechny návrhy mají společné cíle. V první řadě minimalizovat hmotnost pohybujících se součástí. Dále se snaží integrovat senzor polohy do tuhého rámu pohonu a tím minimalizovat chyby měření. Většina návrhů předpokládá stacionární cívky s magnetickým obvodem a pohybující částí s permanentními magnety. Všechny návrhy řeší různým způsobem lineární vedení vozíku s vodičem příze.

První návrh ^[35] předpokládá pohybující cívku obdélníkového průřezu v magnetickém poli vytvořeném sekcemi z permanentních magnetů. Osová šířka rámce cívky odpovídá šířce sekce permanentních magnetů. Proud procházející cívkou je kolmý na magnetické pole permanentních magnetů. Pro výslednou magnetickou sílu platí rovnice (4.14).

$$(4.14) \quad d\vec{F}(x,t) = \vec{B}(x) \times \vec{j} \cdot I(t) \cdot dl(x)$$

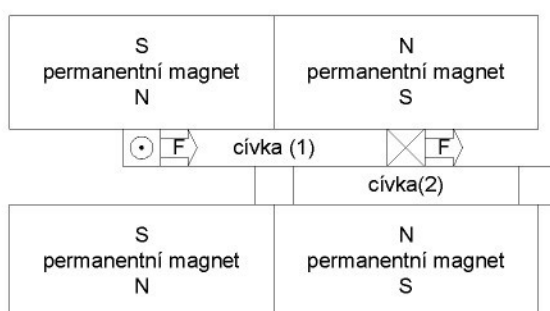
Magnetické pole není homogenní. Vlivem střídání magnetických pólů v jednotlivých sekcích právě tato nehomogenita bude způsobovat nelinearitu úlohy řízení při přechodu cívky mezi jednotlivými magnetickými sekcemi. Tato nelinearita se projeví i v průběhu působící síly. Časový průběh proudu bude využit pro řízení síly pohonu. Vektor $\vec{j}$ je jednotkový vektor určující směr proudu a $dl(x)$ je délka vinutí elementu cívky v místě x .



Obr. 4.6 - Cívka na rozhraní dvou sekcí permanentních magnetů

Komutace proudu se předpokládá v místě přechodu rámce cívky mezi dvěma sekcemi, kde se mění směr proudu. V době komutace, při průchodu nulového proudu, je výsledná síla nulová.

Proto je nutné pohon koncipovat jako alespoň dvoufázový, s dvěma rámy vzájemně přesazenými. Na obrázku Obr. 4.7 je *cívka (1)* v záběru zatímco na *cívce (2)* probíhá komutace.



Obr. 4.7 - Dvoufázové uspořádání

Jako snímač polohy předpokládá návrh optický enkodér na rámu pohonu nebo soustavu hallových sond umístěných ve spodní části rámu. Hallové sondy detekují průchody mezi magnetickými sekcemi a tak slouží vlastně jako komutační

snímače. Měření z hallových snímačů bude ovšem ovlivněno magnetickým polem vyvolaným cívkou protékanou proudem.

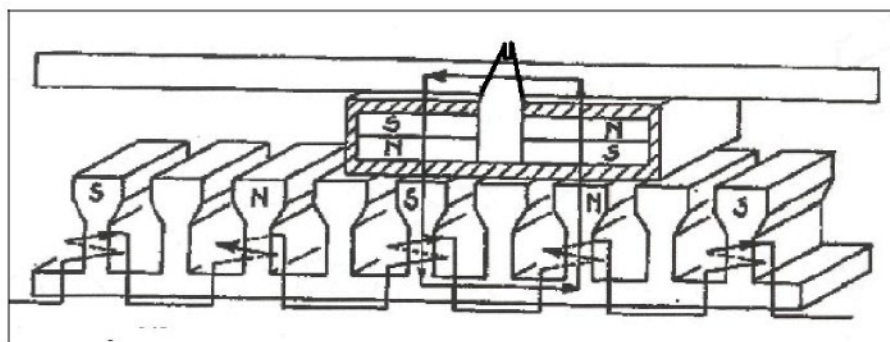
Jako lineární vedení se předpokládá kluzák na podélné tyči doplněný vložkami z kluzného materiálu.

Výhodou tohoto návrhu je minimální hmotnost pohybujících se součástí díky pohybující se cívce bez magnetického obvodu. Nevýhodou je ale nízká magnetická indukce vyvolaná procházejícím proudem, neboť cívka nemá žádný magnetický obvod. Lineární vedení musí vlastně kompenzovat pouze ohybový moment elementů sil od jednotlivých fází. Maximum momentu je právě v místě komutace cívky.

Vodiče umístěné v horním a spodním příčniku nepřispívají k vytvoření posunovací síly, ale podílejí se na tepelných ztrátách ve vinutí.

V návrhu není uveden způsob řízení proudu. Bude-li napájen obdélníkovým průběhem či harmonickým fázově posunutým signálem. Rovněž není uveden způsob řízení polohy, zda půjde o otevřenou regulační smyčku pouze s komutačními spínači či o uzavřenou zpětnovazební smyčku.

Další dva návrhy předpokládají stacionární cívku a posuvný člen z permanentních magnetů.^[34] Tím je eliminován problém pohyblivých přívodů.



Obr. 4.8 - náčrt pohonu

V principu je na Obr. 4.8 zobrazen lineární dvoufázový motor.

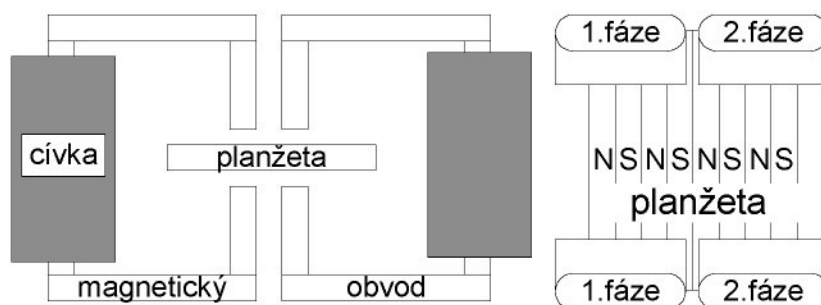
Vozík je opatřen permanentními magnety a magnetický tok vyvolaný proudem procházejícím přes vinutí se uzavírá přes trámec nad vozíkem. Toto uspořádání částečně kompenzuje přitažlivou sílu permanentních magnetů k pólovým

nástavců. Nevýhodou tohoto uspořádání je velká hmotnost vozíku. To autoři řeší náhradou permanentních magnetů dvojicí cívek buzených stejnosměrným proudem. Napájení cívek je navrženo plochým vodičem či pružným kabelem.

Šrafovaná část je obal vozíku z kluzného materiálu, dále je v návrhu dvojice tyčí lineárního vedení před a za nákretnou.

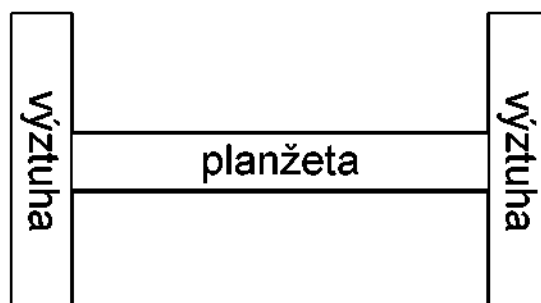
Autoři předpokládají dva způsoby řízení pohonu. Prvním je klasické řízení v uzavřené regulační smyčce. Druhé pak chod v otevřené smyčce, což lze realizovat pouze při definované zátěžné síle, ale na úkor dynamiky pohonu. Řízení v otevřené regulační smyčce není použitelné pro rozvádění.

Další návrh je na Obr. 4.9, v jednodušší variantě, také dvoufázový lineární motor. Návrh přepokládá dvě dvojice cívek s pólovými nástavci s jemnou roztečí, na jedné cívce je vždy několik pólových nástavců. To podstatně zjednodušuje uspořádání cívek motoru. Mezi pólovými nástavci prochází segmentovaná magnetická planžeta, ke které je připevněn vodič příze.



Obr. 4.9 - Návrh lineárního pohonu

Největším problémem návrhu je zajištění dostatečné tuhosti planžety. Tuhost planžety by se dala zlepšit změnou jejího podélného průřezu podle Obr. 4.10.



Obr. 4.10 - Zvýšení tuhosti planžety změnou jejího profilu

Lineární vedení je řešeno vodící tyčí, na kterou dosedá vodící očko pomocí kladečky. Autoři ve složitější variantě předpokládají třífázové uspořádání s harmonickým napájením a regulací v uzavřené regulační smyčce. Návrh je tedy v podstatě speciálním synchronním lineárním motorem.

U geometricky složitějších motorů je vztah (4.14) obecně platný. Vinutí motoru můžeme nahradit soustavou vodičů pohybujících se v homogenním magnetickém poli. Při pohybu vodiče rychlostí v v kolmém směru na vektor magnetické indukce B kolmým průmětem vodiče do roviny kolmé na směr pohybu a vzniklou úsečku opět kolmo promítneme do roviny kolmé na směr indukce dostaneme činnou délku vodiče l_ϵ , dostáváme vztah pro indukované napětí ve tvaru (4.15).

$$(4.15) \quad u_i = Bl_\epsilon v$$

Všechny vodiče v jedné fázi nad jedním pólem označíme N , což je také počet závitů cívky odpovídající jednomu pólpáru. Pro stanovení závislosti indukovaného napětí v závislosti na poloze podle^[6] (4.16) označíme okamžitý počet vinutí nad pólem n .

$$(4.16) \quad u_{i1}(x) = Bl_\epsilon v n(x)$$

Sousední pól s opačným směrem magnetické indukce indukuje napětí (4.17).

$$(4.17) \quad u_{i2}(x) = -Bl_\epsilon v (N - n(x))$$

Výsledné indukované napětí v jedné fázi odpovídá vztahu (4.18).

$$(4.18) \quad u_{ic}(x) = u_{i1} + u_{i2}$$

Stroj ovšem může mít počet pólů p , tedy počet pólů m . Pro celkové indukované napětí (4.19) v případě sériového zapojení vinutí platí

$$(4.19) \quad u_{iL1}(x) = m(u_{i1} + u_{i2})$$

Obdobné odvození lze provést pro závislost síly na poloze, kde vycházíme ze vztahů (4.20) a (4.21).

$$(4.20) \quad F_1(x) = Bi(t)n(x)$$

$$(4.21) \quad F_2(x) = Bi(t)(N - n(x))$$

Celková síla je rovna (4.22).

$$(4.22) \quad F_c(x) = F_1 + F_2$$

Pro m pólový stroj potom platí rovnice (4.23).

$$(4.23) \quad F_{cL1}(x) = m(F_1 + F_2)$$

Celková síla vyvolaná motorem je rovna součtu sil vyvolaných všemi fázemi podle (4.24).

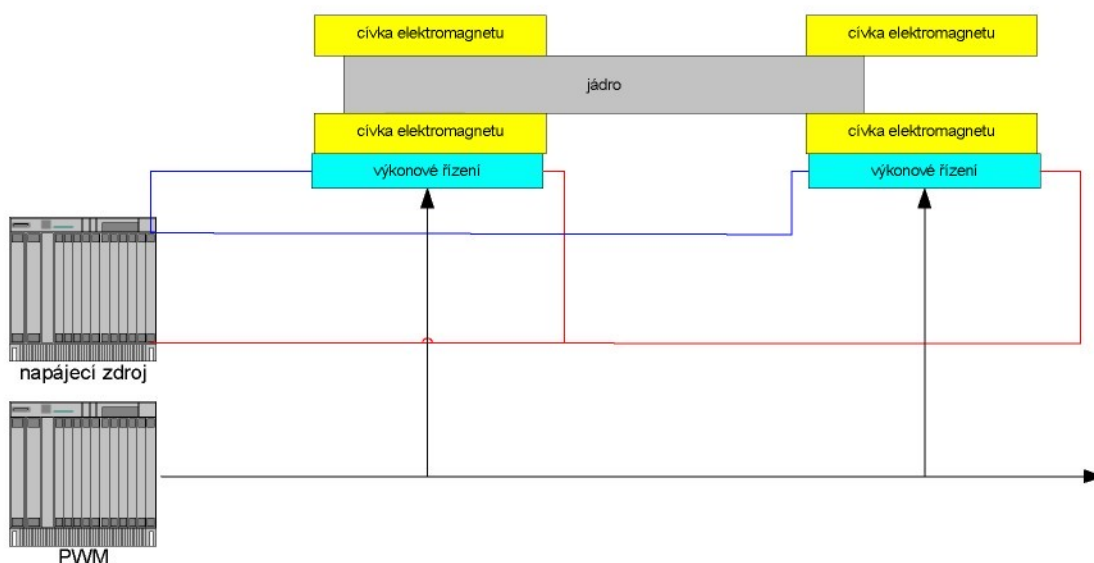
$$(4.24) \quad F_{tot}(x) = \sum_{k=1}^n F_{cL(k)}(x)$$

Z rovnic (4.23) a (4.19) dostáváme po úpravách (4.25).

$$(4.25) \quad \frac{U_{Li \max}}{v_{\max}} = \frac{M_{Li \max}}{I_{Li \max}} = BlmN$$

Ta definuje základní požadavky pro návrh motoru. Z požadavku na rychlost určíme maximální hodnotu stejnosměrného obvodu a naopak z požadovaného momentu určíme maximální hodnotu fázového proudu pro návrh elektroniky měniče. Nebo můžeme postupovat analogicky a navrhnout motor.

Konstrukčně poměrně jednoduchou alternativou je využití elektromagnetu pro vratný pohyb. Zdvihová závislost by se regulovala pomocí hodnoty proudu v obou cívkách. Cívky by byly stacionární a uspořádané podle obrázku.



Obr. 4.11 – Polohování pomocí elektromagnetu

Jádro by bylo zapouzdřeno ve vhodném materiálu, tím by bylo realizováno jak kluzné ložisko tak vymezena minimální mezera.

Průběh zdvihové závislosti $x(t) = f(i(t))$ a opakovatelnost polohování by musely být ověřeny na funkčním modelu, protože f je nelineární funkce.

Pro dosažení vysoké dynamiky by bylo možné navinout dvě cívky obdobně jako u transformátoru typu E. Vnitřní cívka by byla dimenzovaná na normální chod a

vinutá slabším průřezem drátu. Vnější cívka by byla spínaná jen krátkodobě, průtokem vysoké hodnoty proudu by bylo dosaženo „silového impulsu“. Zásadní nevýhodou jsou ovšem velké nároky na zástavbu, v podstatě trojnásobek požadovaného zdvihu.

Pokud bychom místo jádra využili permanentní magnet, mohli bychom zvýšit dynamiku pohonu současným řízením proudu v obou cívkách. Směr pohybu bychom potom řídili směrem proudu ve vinutích cívek.

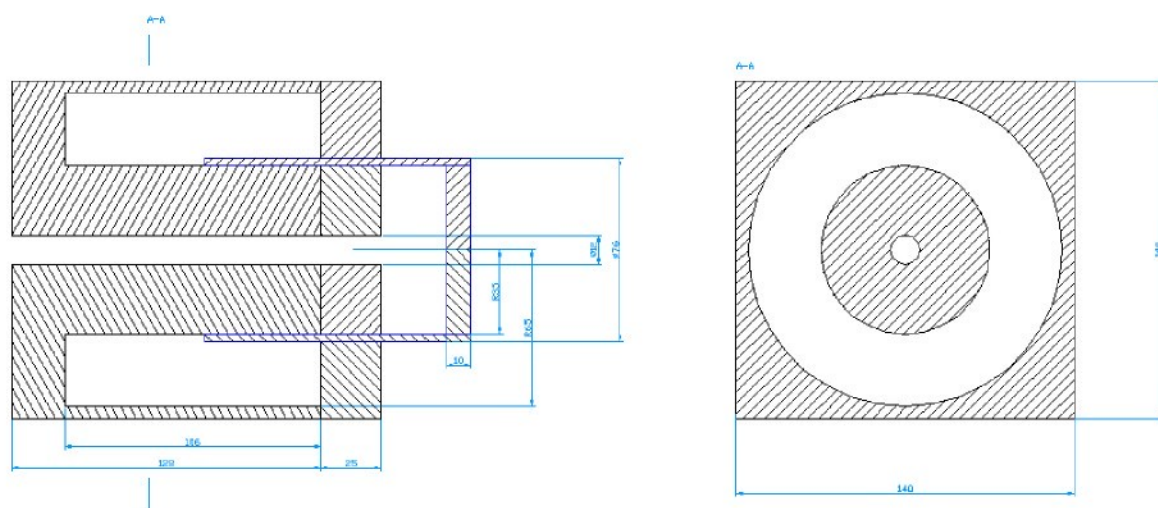
Zajímavou metodou jak určit polohu jádra v elektromagnetu je měření impedance respektive fázového posuvu proudu a napětí na elektromagnetu $\varphi=f(x)$. Protože vlastní budící napětí je používáno pro regulaci akčního členu a tedy proměnné, je určení fázového posunutí obtížné. Proto by bylo vhodné použít nevýkonový harmonický signál. Obtížná by pravděpodobně byla detekce signálu ve spektru vzniklém z PWM řízení.

Další možností by bylo nalepení řady permanentních magnetů a snímání „pulsů“ v senzorickém vinutí během pohybu. To by ale bylo problematické s ohledem na magnetické pole vytvářené cívkami elektromagnetu.

Všechny návrhy se snaží minimalizovat hmotnost pohybujících se částí a dosáhnout tak vysoké dynamiky a integrují vodiče příze přímo do konstrukce pohyblivé části. Společným jmenovatelem návrhů je poměrně složitá konstrukce vyplývající z vícefázového uspořádání motorů. Vlivem tohoto vícefázového uspořádání je také složitá regulace výsledné síly. Oproti tomu elektrodynamický systém má jak nízkou hmotnost pohybujících částí tak snadné řízení síly.

5 Elektrodynamický pohon rozvádění

Výrobek se skládá ze dvou základních částí. Ze „statoru“, který je tvořen magnetickým obvodem s permanentním magnetem, a „rotoru“, který je tvořen válcovou cívkou. Rozložení pólových nástavců na statoru ukazuje následující schéma.



Obr. 5.1 - Schéma elektrodynamického systému

Závity cívky jsou zalité epoxidovou pryskyřicí, která je vyztužena syntetickým vláknem. Tím tvoří samonosný skelet rotoru. Rotor je z jedné strany zaslepen nedemontovatelným čelem z hliníkové slitiny. V čele je vyfrézováno několik ledvinovitých otvorů pro lepší chlazení a několik závitových děr pro montáž k zařízení. Na opačném konci jsou vyvedeny z pláště cívky konce vinutí, na patce svorkovnice.

Přenos energie (proudu) do rotoru je realizován pomocí pružných měděných planžet.

Při buzení rotoru stejnosměrným proudem dojde k vtahování cívky do statoru. Při změně polaritý proudu se změni i směr výsledné síly, cívka tedy vyjíždí ven ze statoru.

Uvnitř statoru je další cívka, do které se zasouvá jádérko v závislosti na aktuální poloze rotoru, čímž dochází ke změně indukčnosti senzorické cívky. Změny indukčnosti lze využít pro určení aktuální polohy.

Po zjištění základních mechanických rozměrů a elektrických parametrů jsme změřili průběh magnetického pole mezi pólovými nástavci.

Stator:

Vnější rozměry statoru: (š . v. d) 100 x 140 x 153 mm

Průměr trnu: Ø 70 (umístěný ve středu statoru)

Šířka mezery: 3 mm

Rotor:

Vnější průměr cívky: Ø 75,5

Vnitřní průměr cívky: Ø 70

Šířka čela cívky: 9 (hliníková slitina, možnost připojení zařízení)

Hmotnost cívky: 228,8 g

Hmotnost cívky včetně vedení a senzorického jádérka: 301,62 g

Indukčnost cívky: 12 mH

Odpor: 1,3 Ω

Senzorická cívka:

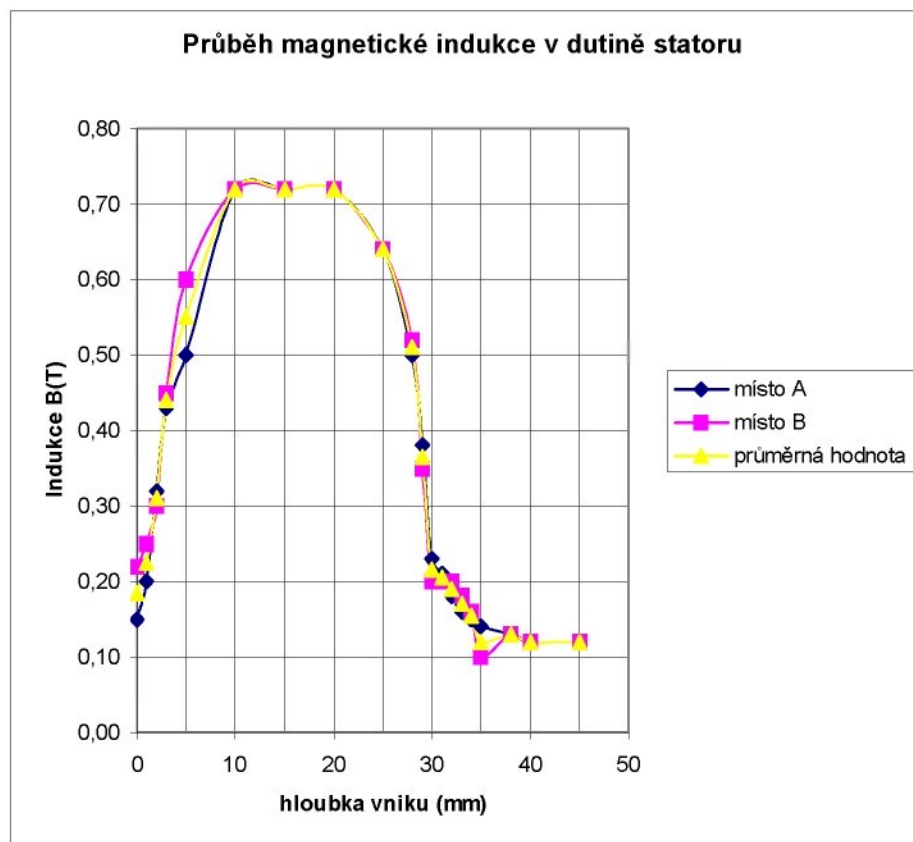
Průměr jádra: Ø6

Vnitřní průměr cívky: Ø6,5

Vnější průměr: Ø11

Průměr drátu: Ø 0,05 (třívrstvá cívka)

Severní pól je tvořen vnější částí, jižní pól je na trnu statoru. Rozložení magnetického pole uvnitř vzduchové mezery dokumentuje následující graf:



Graf 5.1 – Průběh magnetické indukce v dutině statoru, odměřováno od čelní roviny

Hloubka vniku je odměřována v axiálním směru od čelní stěny statoru do vzduchové mezery. Radiálně je pole homogenní v příslušné hladině hloubky vniku.

Zásadní výhodou celého zařízení je minimální hmotnost pohybujících se částí. Další výhodou je, že výstupní síla je přímo úměrná protékajícímu proudu podle (5.1) a není závislá na poloze.

$$(5.1) \quad F(t) = k_F \cdot I(t)$$

5.1 Ověření funkce elektrodynamického motoru

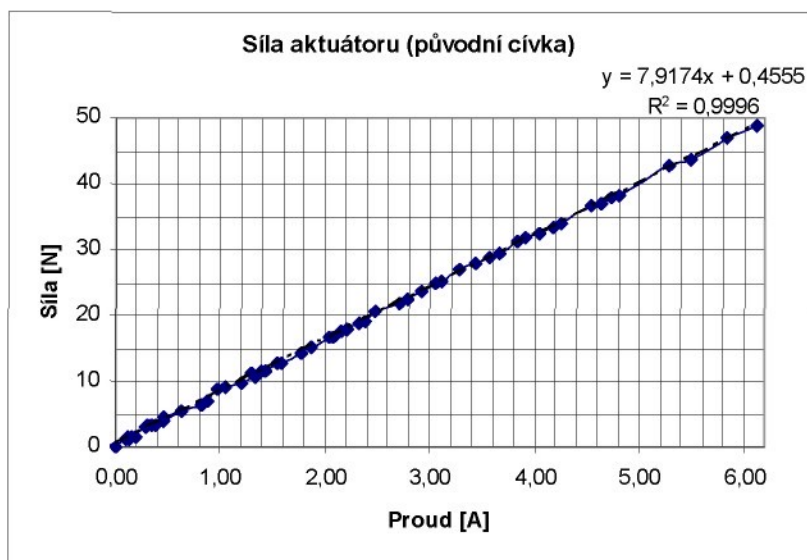
Pro ověření funkce jsme aktuátor připojili na zdroj stejnosměrného napětí, což odhalilo dva základní problémy. Velký přechodový odpor v místě upevnění páskového vodiče a rotorové cívky jsme odstranili použitím vějířových podložek mezi páskem a svorkovnicí. Druhým problémem byla přerušená rotorová cívka.



Obr. 5.2– Detail opravy rotorové cívky

Pomocí měřících hrotů bylo na vnitřní straně cívky určeno místo přerušení vodičů (v těsné blízkosti mechanické praskliny poblíž svorkovnice). Část vnějšího pláště vinutí byla odstraněna, vinutí chemicky ošetřeno a spojeno měkkou pájkou. Zpětný běh vzdáleného konce vinutí byl realizován měděným páskem. Část poškozeného pásku byla nahrazena měděným vodičem.

Po této opravě jsme mohli uskutečnit první měření. Aktuátor byl připojen na regulovatelný zdroj napětí a po odeznění přechodového děje byl odměřen proud procházející cívkou a hodnota vyvolané síly.



Graf 5.2 – Průběh síly aktuátoru v závislosti na napájecím proudu

Z grafu je patrná lineární závislost síly na napájecím proudu. Síla je v závislosti na poloze cívky (zdvihu) konstantní.

Z důvodu poškození vinutí u originální cívky s malým průřezem použitého vodiče jsme vyrobili cívku novou vinutou silnějším drátem.



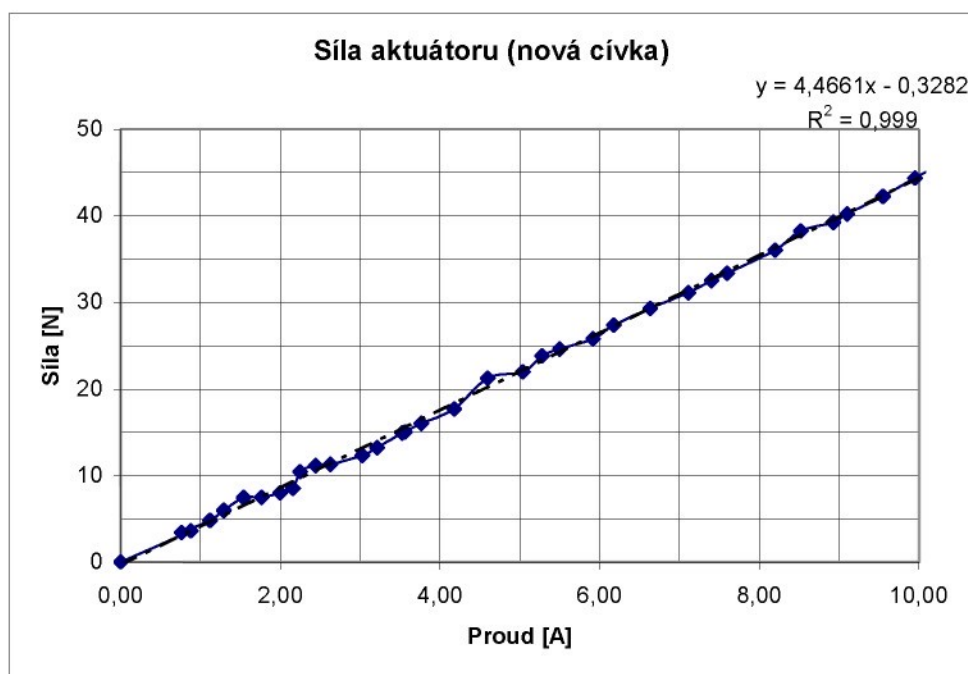
Obr. 5.3 – Originální cívka (vlevo), nová cívka (vpravo)

Parametry nové cívky:

Indukčnost cívky: 0,27 mH

Odpor: 0,4 Ω

Na nové cívce jsme provedli měření jako na původní cívce. Po odeznění přechodového děje jsme odměřili zátěžnou sílu vyvolanou příslušnou hodnotou proudu.



Graf 5.3 – Průběh síly aktuátoru v závislosti na napájecím proudu

Použití silnějšího vodiče má za následek menší indukčnost a méně činných závitů mezi pólovými nastavci a tedy i menší sílu. Ovšem pro provozní zkoušky je vhodnější, neboť je robustnější a houževnatější. Cívka má vyvedené konce vodičů na každé straně, neboť drát byl volen tak, aby spolu s minimálními vrstvami sklolaminátu zaplnil zcela vzduchovou mezeru. Proto nebyl možný zpětný běh vodiče.

Připojení cívky tedy není řešeno svorkovnicí, ale napájením flexi kabelu přímo na vinutí cívky. Připojné body musí být dobře fixovány ke skeletu a hmotnost těchto bodů musí být co nejmenší, aby dynamické silové zatížení bylo minimální.

5.2 Matematický model elektrodynamického motoru

Pro popis elektrodynamického systému byl vypracován matematický model, na kterém lze simulovat požadavky na napájení v závislosti na zatížení aktuátoru. Rovněž byl vypracován matematický model tyče, který má za cíl emulovat zátěž pohonu.

Při popisu elektrodynamického systému lze do jisté míry využít analogie se stejnosměrným motorem s cizím buzením.

Pro vlastní popis využijeme dvě základní diferenciální rovnice, mechanickou rovnici (5.2) a elektrickou rovnici (5.3).

$$(5.2) \quad m\ddot{x} + D\dot{x} + Fz(t) = Fm(t)$$

kde m je hmotnost pohybující se části pohonu, D reprezentuje koeficient tlumení, Fz představuje časově proměnnou zátěžnou sílu, Fm představuje sílu vyvolanou elektrodynamickým převodníkem.

$$(5.3) \quad u(t) = L \frac{di}{dt} - Bl\dot{x} + Ri(t)$$

První člen elektrické rovnice reprezentuje hodnotu indukovaného napětí vlivem změny napájecího proudu, druhý generátorické účinky závitů pohybujících se v magnetickém poli a třetí úbytek napětí vlivem odporu vodiče cívky.

Sílu elektrodynamického převodníku můžeme vyjádřit vztahem (5.4) za předpokladu že neuvažujeme demagnetizační účinky proudu (5.5).

$$(5.4) \quad Fm(t) = Bi(t)l$$

$$(5.5) \quad \frac{dB}{di} = \text{const.}$$

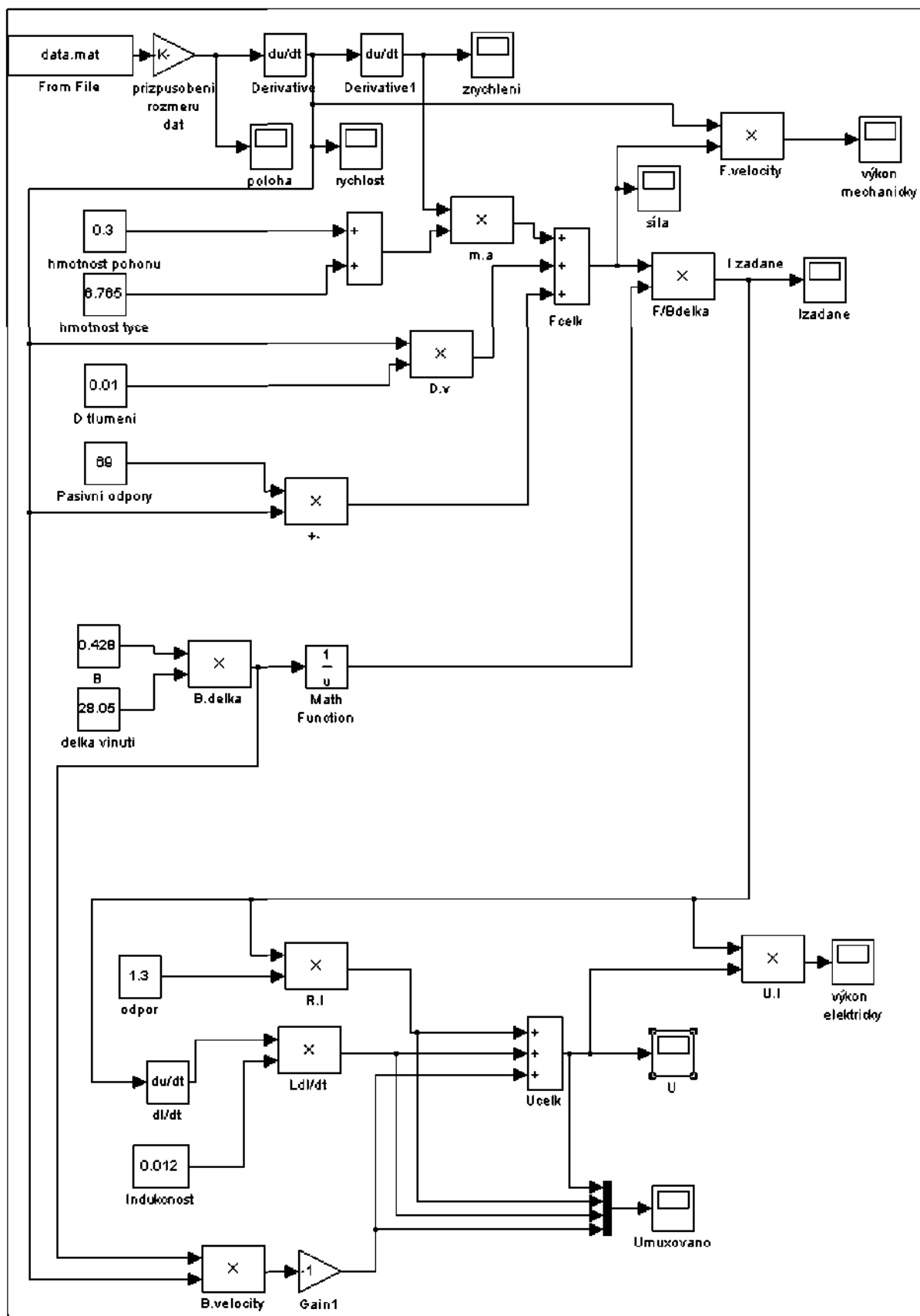
Rovnice (5.6) a (5.7) vyplývají z konstrukčního upořádání převodníku. Počet činných závitů ve vzduchové mezeře je konstantní, a indukčnost cívky v závislosti na poloze jsou konstantní.

$$(5.6) \quad \frac{dl}{dx} = \text{const.}$$

$$(5.7) \quad \frac{dL}{dx} = \text{const.}$$

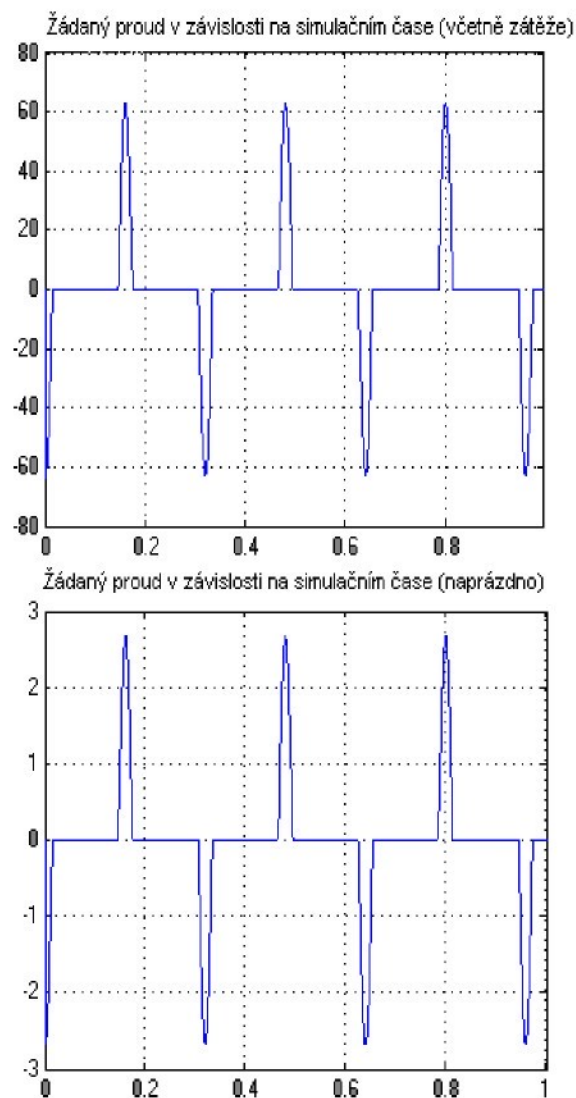
Vzhledem k tomu, že požadovaná trajektorie je známá a zadaná, chtěli jsme určit časový průběh napájecího napětí cívky. Protože analytické řešení takové úlohy by bylo náročné, využili jsme program MatLab-Simulink k modelování chování pohonu ve stavu naprázdno a při zatížení.

Ze zadané trajektorie x snadno určíme $\dot{x}$ a $\ddot{x}$, dále s využitím rovnic (5.2) a (5.3) vyjádříme požadovanou hodnotu napájecího proudu a poté hodnotu napájecího napětí pro pohon.

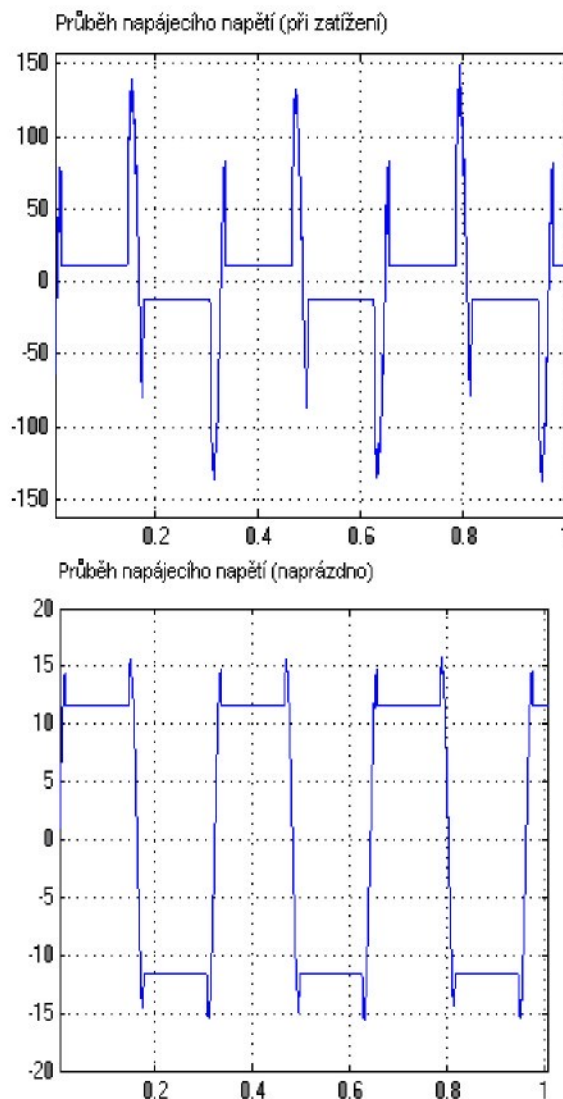


Obr. 5.4 - Simulační schéma elektrodynamického motoru

Pro buzení pohonu jsme využili předepsanou zdvihovou závislost válcové vačky. Dále jsme do modelu zahrnuli vliv pasivních odporů vedení tyče určené měřením. Vlastní rozváděcí tyč jsme nahradili hmotným bodem, který spolu s pasivními odpory představuje zátěžnou sílu.



Graf 5.4 – Porovnání požadovaného proudu (A) naprázdno a při zatížení



Graf 5.5 – Porovnání požadovaných napětí (V) při chodu naprázdno a při zatížení

Hodnoty rychlosti a zrychlení se blíží hodnotám naměřeným na rozváděcí tyči. Ve výsledcích jsou patrné „oscilace“ jak v rychlosti tak zejména ve zrychlení, což je numerickou derivací stupňovitě zadané funkce zdvihu.

Pro napájení motoru naprázdno je špičkový proud $2,7A$ a délka tohoto pulsu cca $0,02s$. Při předpokládaném zatížení rozváděcí tyčí je to již $63A$, délka pulsu je stejná. Špičkové hodnoty napětí jsou potom $140V$ a trvalé napětí je $15V$. Při modelování při zatížení byly zanedbány pasivní odpory tyče. Ty jsou ve srovnání s dynamickou zátěžnou silou vyvolanou rozváděcí tyčí zanedbatelné.

Hodnoty získané z modelu při zatížení jsou spíše demonstrativní. Stávající cívka není dimenzovaná na špičkové proudy. Při změně parametrů cívky, tj. odporu, indukčnosti, aktivní délce závitu, bude nutné model přepočítat. Struktura modelu se nemusí modifikovat, stačí pouze zadat nové parametry.

5.3 Návrh elektroniky senzoru polohy

Aktuátor měl v sobě integrováno čidlo polohy. V ose magnetického obvodu je umístěna senzorická cívka, do které se zasouvá jádérko. Zasunutím jádérka se mění indukčnost cívky. Kvůli přerušení senzorické cívky je tento senzor nefunkční.

Pro odečítání polohy byla navinuta nová cívka jako dvouvrstvá cylindrická cívka o průměru vodiče 0.15mm a takových zástavbových rozměrech, aby mohla nahradit původní senzorickou cívku. Pro odečet polohy byl realizován převodník indukčnosti na stejnosměrné napětí podle schématu, Schéma 5.1. Indukčnost cívky se pohybuje v závislosti na poloze jádra v rozmezí $38 \mu H - 600 \mu H$. Výstupní napětí převodníku je $90 - 220 mV$.

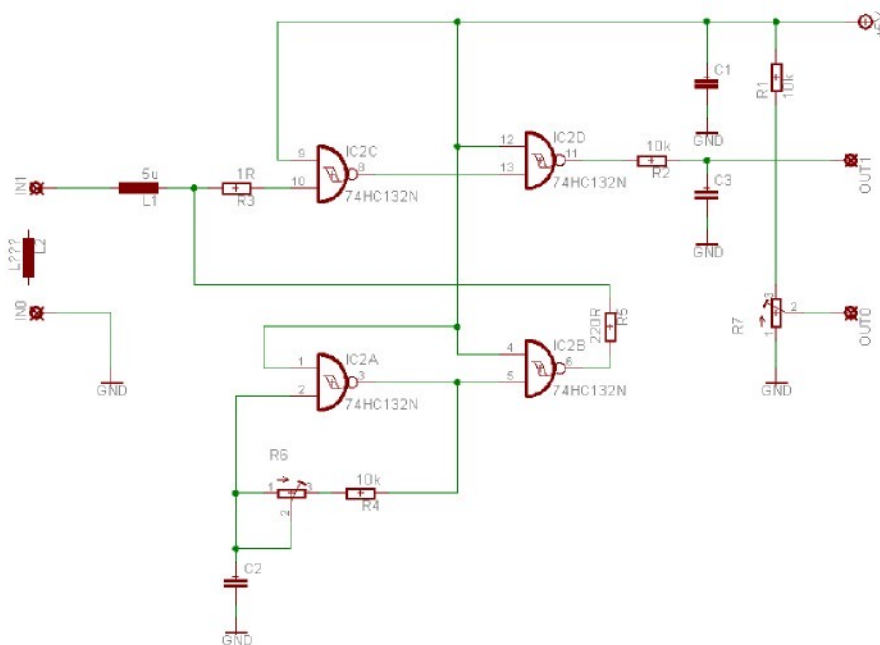
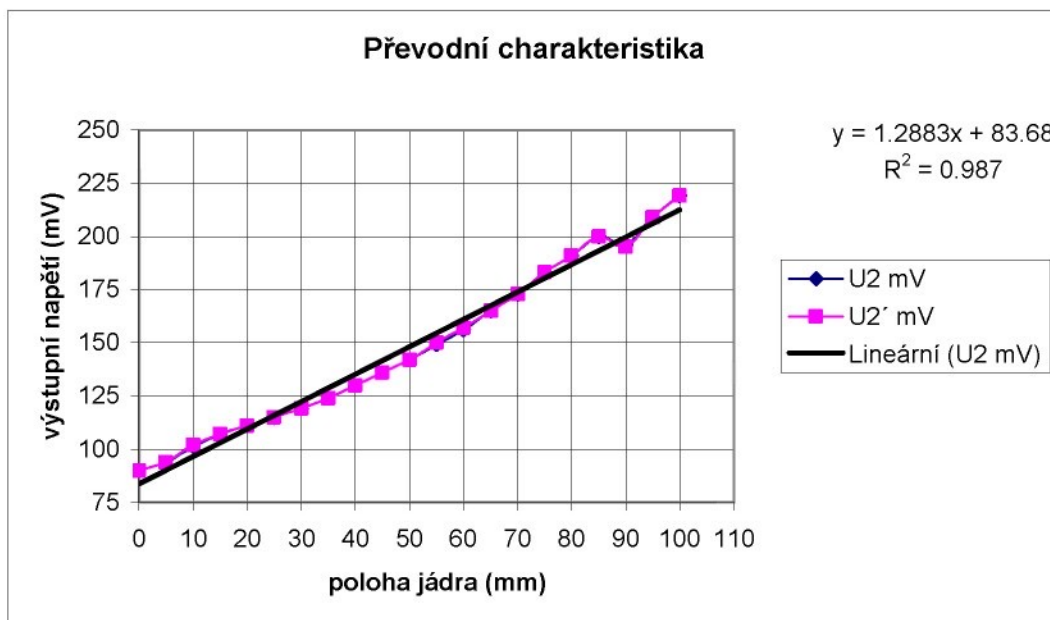


Schéma 5.1- Převodník indukčnost/napětí (pro odměřování polohy)



Graf 5.6 - Převodní charakteristika indukčního senzoru polohy

Převodník má dobrou linearitu a prakticky žádnou hysterezi. Zavádějící hodnota zdvihu 90mm je způsobená „nehomogenitou“ v návinu cívky, respektive „odskokem“ závitů cívky během navíjení. Pokud bychom chtěli tento systém průmyslově využít, musela by být kostra cívky zhotovena z ořezavzdorného materiálu a také by musela být trvale vymezena její poloha vůči dutině statoru.

6 Laboratorní model elektrodynamického pohonu

Jak vyplývá z matematického popisu, velikost a směr proudu určují velikost a směr výsledné síly. Cílem tedy bylo navrhnout zařízení, které je schopné udržovat konstantní proud v závislosti na vstupním signálu. Proto byl realizován výkonový zesilovač podle schématu, Schéma 6.1, na bázi obvodu TDA 2040.

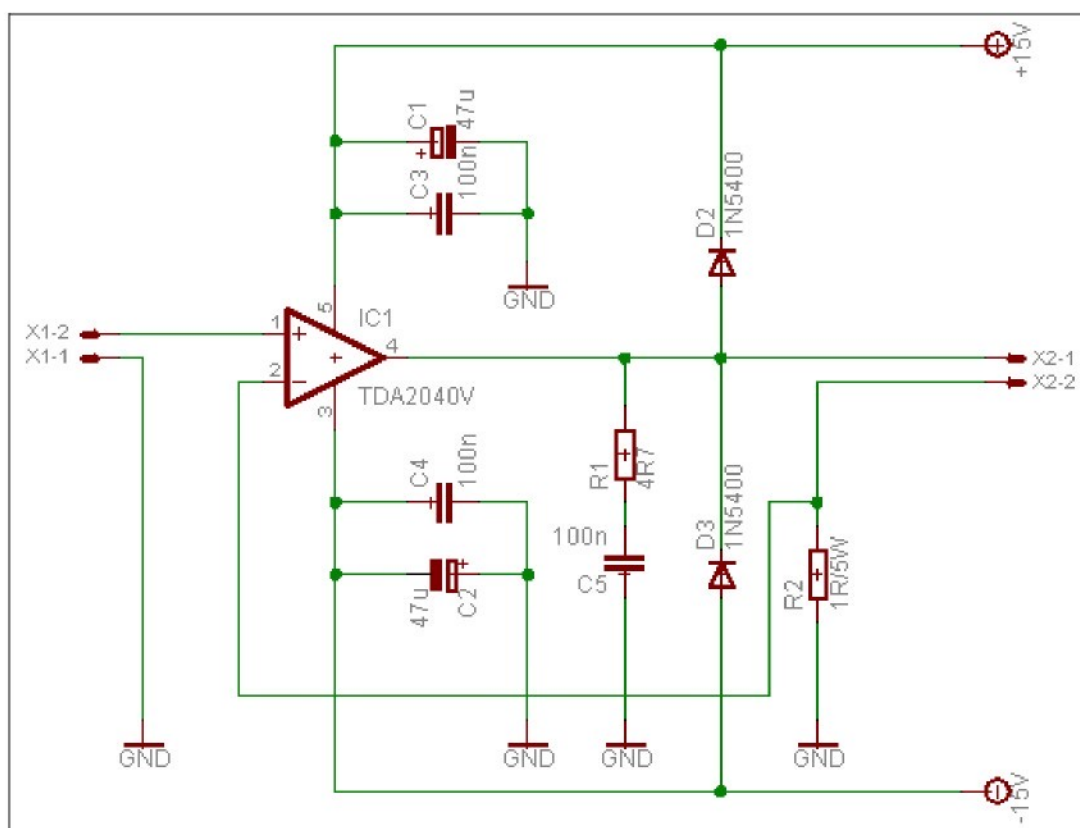


Schéma 6.1 – Zpětnovazební zdroj proudu s TDA 2040

Jako generátor žádaného průběhu proudu byl pro první experimenty použit funkční generátor.

6.1 Buzení funkčním generátorem

Buzení periodickým signálem v podstatě znamená, že periodicky měníme hodnotu „stejnoseměrného“ proudu ve dvou polaritách a tím docílíme změny směru pohybu.

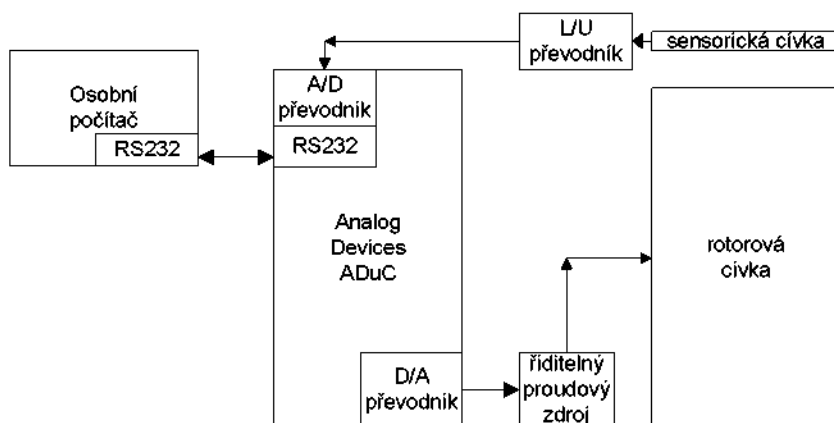
Z předchozího měření vyplývá, že síla elektrodynamického převodníku odpovídá napájecímu proudu. Čas průchodu proudu resp. frekvence odpovídá zdvihu resp. poloze rotoru. Čím kratší dobu prochází napájecí proud, tím menší trajektorii stihne cívka překonat.

Při buzení periodickým signálem bez jakékoli zpětné vazby dochází k postupnému posunu nulového bodu. To může být způsobeno dvěma základními faktory. Prvním faktorem je nesymetrie silového namáhání vlivem pasivních odporů, protože pasivní odpory v obou směrech nejsou shodné. Druhým faktorem je nesymetrie budicího signálu nebo nesymetrie vlastního zesilovače.

Jako budicí signál je použit funkční generátor, na kterém lze nastavit amplitudu, frekvenci, stejnosměrnou složku a vybrat tvar signálu (sinus, pila, obdélník). Byly ověřeny změny tvaru signálu, amplitudy a změny offsetu na výsledný pohyb elektrodynamického motoru.

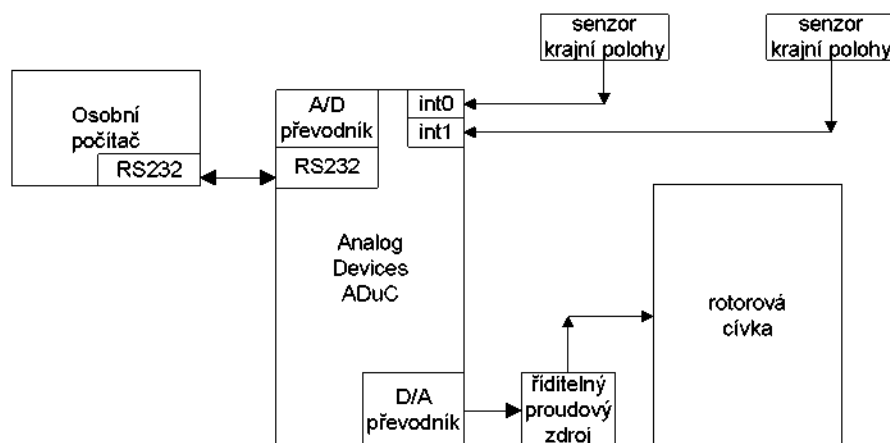
6.2 Využití mikroprocesoru ADuC 812

Řízení elektrodynamického pohonu bylo realizováno mikropočítačem z rodiny ADuC. Integrované AD a DA převodníky umožní jak odměřování polohy tak generování signálu pro výkonové zesilovače podle Obr. 6.1.



Obr. 6.1– Blokové schéma pohonu s využitím mikropočítače ADuC

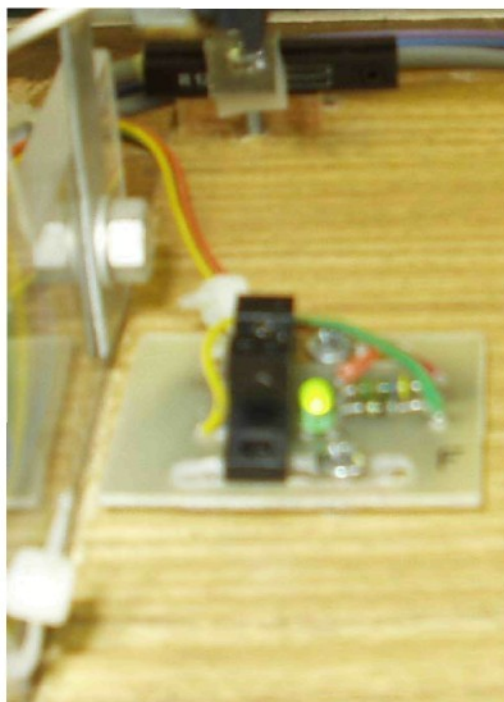
Vzhledem k malému výpočetnímu výkonu mikrokontroléru bylo obtížné realizovat polohovou, rychlostní a proudovou regulační smyčku. Proto bylo upuštěno od zpětnovazebního spojitého řízení a bylo vyzkoušeno řízení v otevřené regulační struktuře Obr. 6.2.



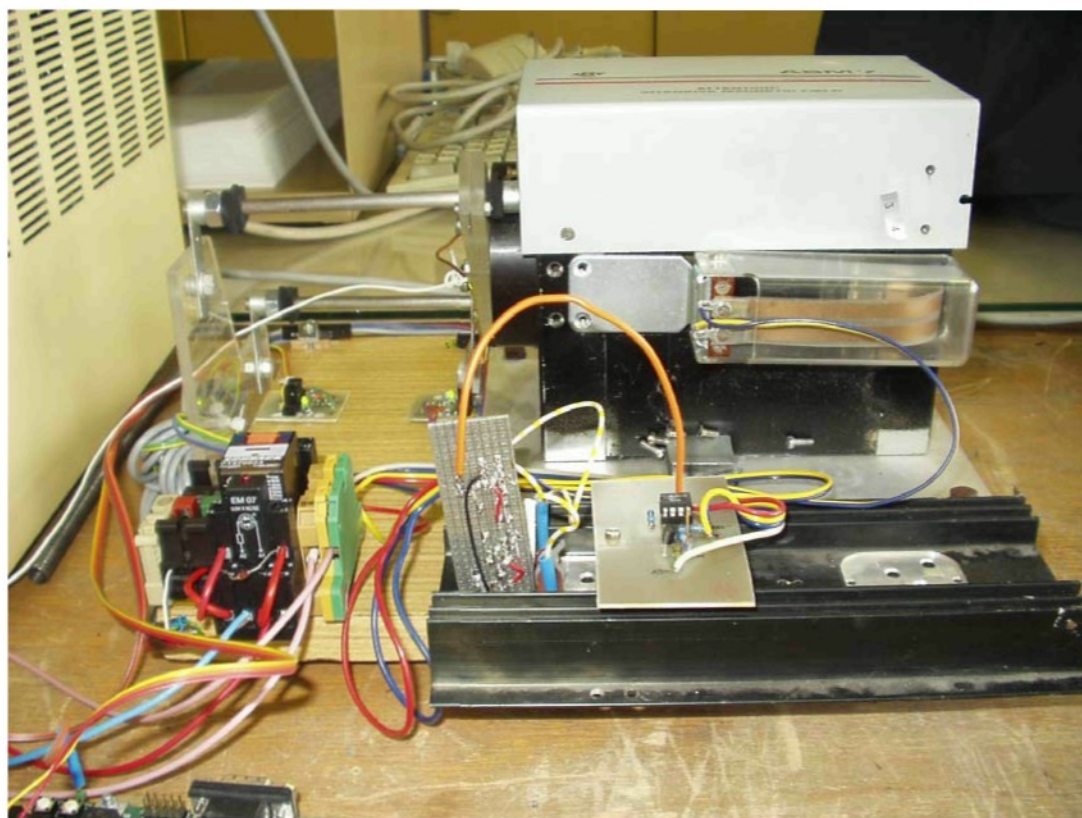
Obr. 6.2 - Otevřená regulační struktura

Jako senzory krajní polohy byly navrženy moduly s optickými závoramy Obr. 6.3. V době dosažení krajní polohy je generováno přerušení pro mikropočítač ADuC, v obslužné rutině dojde k úpravě hodnoty DA převodníku a tím ke změně směru a rychlosti pohybu.

Mimo krajní polohy je motor řízen konstantním proudem, tedy na konstantní sílu. Aby nedošlo k poškození zařízení během experimentů, bylo vybaveno ještě druhou sadou koncových snímačů a jednoduchou reléovou logikou, která odpíná proudový zesilovač od napájecího zdroje v případě překročení krajní polohy první sady snímačů.



Obr. 6.3– Modul bezkontaktního čidla krajní polohy

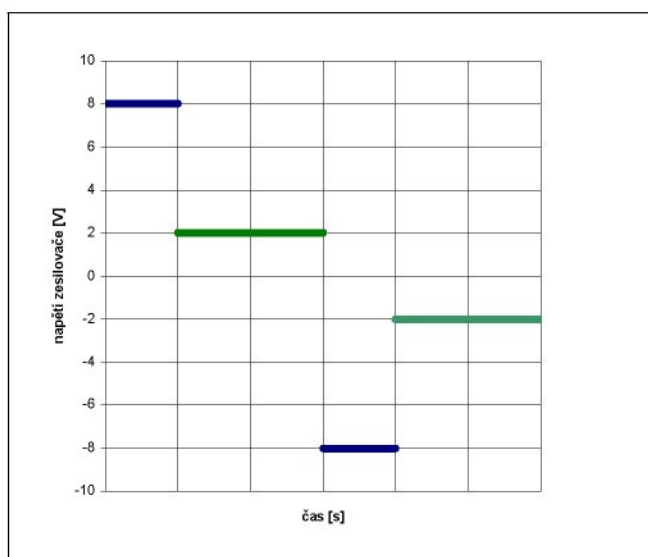


Obr. 6.4 – Náhled aktuátoru se senzory krajní polohy, bezpečností reléovou logiku a proudový zesilovač

Pro nahrání parametrů bylo využito rozhraní RS232, parametry jsou zadávány pomocí přehledného rozhraní Obr. 6.5. Vzhledem k tomu, že systém pracoval bez polohové zpětné vazby, bylo cílem zvolit vhodné hodnoty tak, aby průběh budícího signálu vypadal přibližně podle náhledu. Modré průběhy jsou akcelerační špičku o hodnotě „Peak Far“ či „Peak Near“, délka trvání se zadává pomocí „Peak time“ a hodnota trvalého budícího napětí odpovídá zelenému průběhu a parametru „Budící napětí“.

Parametr	Hodnota	Napětí	Rozdíllové
Budící napětí FAR - R0	128	2,5 V	0 V
Peak FAR - R1	128	2,5 V	0 V
Peak time FAR - R2	0		
Budící napětí NEAR - R3	128	2,5 V	0 V
Peak NEAR - R4	128	2,5 V	0 V
Peak time NEAR - R5	0		

Obr. 6.5 – Náhled ovládacího rozhraní



Obr. 6.6 – Náhled budícího signálu proudového zdroje

Zásadní nevýhodou tohoto funkčního modelu pohonu byla absence polohové zpětné vazby. Systém byl tedy pouze ovládán „konstantní“ hodnotou budicího napětí v čase a nebyl schopen dynamicky reagovat na změnu zátěžné síly. Rovněž analogově řešený proudový zdroj není vhodný pro skutečný pohon.

7 Zpětnovazební regulační struktury pro řízení pohonů

Regulace pohonů fungující na základě zpětné vazby odvozuje akční zásahy z velikosti a tendence regulační odchylky. Regulační odchylka vzniká působením poruchových signálů na regulovaný proces^[10]. Při využití PI regulátoru dochází k regulaci procesu, aniž bychom znali velikost a příčinu poruchové veličiny. Pokud bychom ale znali velikost poruchové veličiny, mohli bychom ji využít pro regulaci dříve, než dojde k působení na systém, respektive než dojde nežádoucímu výstupu systému a tedy vytvoření regulační odchylky. PI regulátor reaguje až při vzniku regulační odchylky a neumožňuje prediktivní zásahy pro její nevytvoření. Integrační složka, která je nezbytná k odstranění trvalé regulační odchylky v systémech, které samy nemají integrační charakter, může způsobit nestabilitu. Regulátor PI provádí regulaci systémem pokus-omyl a to právě způsobuje kmitavou odezvu na výstupu regulátoru.

7.1 Realizace proporcionálně sumačního regulátoru

Ačkoli je většina systémů spojitá, díky vzorkování měřených veličin a využití číslicových řídicích systémů přechází na diskrétní systémy^[21]. Ideální spojitý PID regulátor lze popsat v časové oblasti vztahem (7.1), zatímco PI regulátor s vynecháním derivační složky pouze rovnicí (7.2).

$$(7.1) \quad u(t) = K_p(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt})$$

$$(7.2) \quad u(t) = K_p(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt)$$

Při číslicovém řízení využíváme číslicový proporcionálně sumační regulátor, kde se integrál nahrazuje součtem podle příslušného pravidla. Je zřejmé, že se

zmenšováním periody algoritmu se PS blíží k PI. Při použití substituce (7.3) a (7.4)

$$(7.3), (7.4) \quad t = k \cdot T_0, \quad I(k) = I(k-1) + T_0 e(k)$$

kde T_0 představuje periodu algoritmu a při zavedení obdélníkového pravidla dostáváme po úpravách rovnici (7.5) .

$$(7.5) \quad u(k+1) = K_P e(k) + \frac{1}{T_i} I(k)$$

Pro lepší aproximaci numerické integrace lze využít lichoběžníkového pravidla (7.6) ,

$$(7.6) \quad I(k) = I(k-1) + \frac{T_0}{2} (e(k) + e(k-1))$$

či Simpsonova pravidla (7.7), kde ale již pro výpočet využíváme (k-2) vzorek.

$$(7.7) \quad I(k) = I(k-1) + \frac{T_0}{3} (e(k) + 4e(k-1) + e(k-2))$$

Pro výpočet numerického regulátoru lze využít rekurzivního tvaru, který vychází z rozdílu (7.8). Při využití obdélníkového pravidla pro integraci dostáváme tvar (7.9)

$$(7.8) \quad u(k+1) - u(k)$$
$$(7.9) \quad \Delta u(k+1) = K_P \left[\Delta e(k) + \frac{T_0}{T_i} e(k-1) \right]$$

a při zavedení substitucí (7.10) a (7.11)

$$(7.10) \quad q_0 = K_P$$

$$(7.11) \quad q_1 = -K_P \left(1 - \frac{T_0}{T_i} \right)$$

dostáváme rovnici pro PS regulátor ve tvaru (7.12) .

$$(7.12) \quad \Delta u(k+1) = q_0 e(k) + q_1 e(k-1)$$

7.1.1 Možnosti zlepšení PS regulace pohonů

Základní možnosti, jak zlepšit regulaci systému za využití konvenčních PS regulátorů, je využití feedforwardů^[2] nebo zvýšení volnosti regulátorů.^[10] Obě metody jsou snadno implementovatelné do DSP a navíc se dají začlenit již do seřazené struktury regulátorů. Další možností je využití kaskádní regulace, která se ale při regulaci pohonů využívá standardně.

Zvýšení stupně volnosti regulace^[11] spočívá ve využití vážené hodnoty žádané veličiny. Při „agresivním“ nastavení regulátoru se prudká změna žádané veličiny projeví na výstupu kmitavou složkou. Pro odstranění této vlastnosti je nutné volit regulátor s dvěma stupni volnosti. Regulátor s vyšším stupněm volnosti může lépe vyhovět protichůdným požadavkům kladeným na regulaci tj. dobrou odezvu na změny žádané veličiny a zároveň potlačovat vliv poruch na systém a z části také šum měření.

Nejednodušším způsobem jak zvýšit stupeň volnosti je zavedení váhy (7.13) do výpočtu regulační odchylky.

$$(7.13) \quad e_w = b \cdot w - y$$

Tato vážená regulační odchylka je využita pouze v proporcionálním regulátoru, integrační složka využívá standardní odchylky. Výhoda vážení vstupní veličiny je také v tom, že nezmění přenos regulátoru z hlediska chybové veličiny.

Při váze $b = 1$, přechází regulace z dvou stupňů volnosti zpět na běžný PS regulátor s jedním stupněm volnosti. Při zavedení vážení si můžeme dovolit vyšší hodnotu proporcionální složky a docílit tak rychlejší odezvy. Pokud se toto

nastavení projeví kmitavě na skok žádané veličiny, tak nastavíme váhu w v intervalu $(0, 1)$ a v podstatě tak omezíme velikost změny žádané polohy.

Kaskádní regulace má opodstatnění pokud proces můžeme rozdělit na dvě samostatné části. Rychlejší systém tvoří vnitřní systém, naopak systém s pomalejší dynamikou je vnější. Typickým příkladem je myšlenkové rozdělení pohonu pomocí elektrické a mechanické časové konstanty^[3], motor se nám tak rozpadá na elektrickou část s rychlou časovou konstantou a mechanickou s řádově pomalejší časovou konstantou.

Další výhodou je možnost měření dvou veličin, proudu a rychlosti. Měření více veličin nám přinese více informací, což se pozitivně projeví v zlepšení kvality regulace.

Výhodou kaskádního uspořádání je, že účinek chybové veličiny působící na vnitřní proces je kompenzován regulátorem vnitřní smyčky a tak chybová veličina ovlivní vnější proces jen minimálně. Další výhodou je urychlení regulace a to jak primární tak sekundární smyčky.

Kaskádní regulace je využitelná zejména tam, kde většina chybových signálů působí na primární proces. V případě pohonů je hlavním chybovým signálem zátěžná síla, která se kompenzuje rychlostním regulátorem, tedy druhou vnitřní regulační smyčkou. Časovou změnu parametrů vinutí, závislost odporu na teplotě a především indukčnost, kompenzuje proudovým regulátorem. Kaskádní regulace je obvyklým regulačním schématem většiny komerčních pohonů.

Regulaci lze také zlepšit pokud jsme schopni určit hodnotu chybové veličiny a kompenzovat její účinky dříve, než vyvolá regulační odchylku. Kvalita takové regulace potom závisí na rychlosti a přesnosti měření chybové veličiny. V případě pohonů by to znamenalo měřit hodnotu zátěžné síly nebo, v případě rotačních pohonů, zátěžného momentu. To by znamenalo osazení pohonu dalším čidlem.

Myšlenka feedforwardu v podstatě spočívá v tom, že přidáme pomocný dopředný regulátor ke stávající zpětnovazební regulační smyčce. Výstupy regulátorů lze sečíst a vytvořit tak hodnotu akční veličiny. Nebo výstupy dopředných regulátorů budou sloužit jako pomocný signál pro zpětnovazební regulátory.

7.2 Regulační struktura elektrodynamického pohonu

O způsobu regulace elektrického pohonu rozhoduje druh jeho užití. Servopohon v momentovém či rychlostním režimu může mít jednodušší regulační strukturu než polohový servopohon.

Pro regulaci elektrodynamického pohonu využíváme konvenčních proporcionálně sumačních regulátorů. Jejich hlavní výhodou je snadné první nastavení a optimalizace podle některého z kritérií. Dále se snadno implementují do signálového procesoru.

Elektrodynamický pohon využívá kaskádu tří regulačních smyček jako polohové servopohonu, viz Obr 7.1. Nejvnitřnější z nich je proudová regulační smyčka, jí nadřazená je rychlostní regulační smyčka. Poslední smyčka je smyčka polohová.

Proudová regulační smyčka má za cíl snížit vliv indukčnosti, která omezuje strmost změny proudu. Dále má za úkol omezit vliv vnitřního indukovaného napětí, které narůstá s rostoucí rychlostí. Proudová regulační smyčka umožňuje dosáhnout co nejvyšší dynamiky a vysokého propustného pásma u lineárních pohonu řádu až 1 kHz. Pro docílení vysoké dynamiky se proudová regulační smyčka nastavuje s deseti až třiceti procentním podílem kmitavé složky.^[2] Překmitý se potom odstraňuje nadřazenou regulační strukturou.

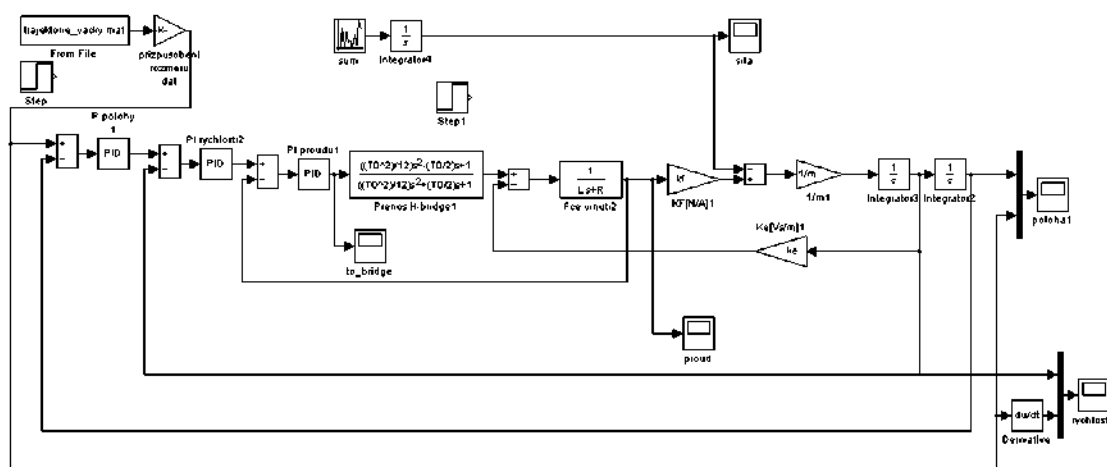
Rychlostní regulační smyčka má za cíl eliminovat závislost rychlosti na velikosti zátěžné síly. Rozdíl žádané rychlosti a aktuální rychlosti je přiveden na vstup proporcionálně sumačního regulátoru, jeho výstup vstupuje v podobě žádaného proudu do proudového regulátoru.

Odezva na skok žádané rychlosti by opět měla být co nejstrmější s překmitem přibližně patnáct procent, ale s rychlým útlumem.

Problémem nastavení rychlostního regulátoru je pronikání různých parazitních frekvencí, zejména vlastní mechanické frekvence pohonu do regulace. Dalším zdrojem šumu je numerická derivace signálu ze senzoru polohy. Proto se využívají na výstupu rychlostního regulátoru číslicové filtry. Filtrovaný signál poté vstupuje do proudového regulátoru.

Polohový regulátor je implementován jako proporcionální regulátor, protože mezi rychlostí a polohou je jednoznačná matematická vazba. Výstup proporcionálního regulátoru vstupuje do rychlostního regulátoru jako požadovaná rychlost. Odezva polohového regulátoru musí být bez překmitu a bez kmitavých složek. Pokud se toho nedá dosáhnout, je nutné upravit zesílení podřízených regulačních smyček.

Pro ověření regulačního algoritmu a optimalizaci regulátorů jsme udělali matematický model Obr. 7.1 ve spojitě oblasti. Model má typickou strukturu tří regulačních smyček, nejvyšší polohové, do ní vnořené rychlostní a proudové. V modelu jsme „myšlenkově“ oddělili model pohonu a model regulačních smyček. Model řízení končí nelineárním členem, který reprezentuje H – můstek.



Obr. 7.1 – Simulační schéma pohonu

Další bloky reprezentují elektrodynamický pohon. Šumového generátoru bylo po integraci využito jako náhodného generátoru zátěžné síly. Regulace byla ověřena jak na skokovou změnu žádané veličiny, tak i na skokovou změnu zatěžovací síly.

Na základě experimentů na modelu jsme vypočetli hodnoty parametrů pro regulátory podle kritérií Tyreus-Luyben i Ziegler-Nichols. V kaskádě regulačních smyček jsme postupovali od vnitřní smyčky k vnější.

	K_c	t_I
P control	$K_u/2$	
PI control	$K_u/2.2$	$P_u/1.2$

Tab. 7.1 - Nastavení regulátoru Ziegler-Nichols

	K_c	t_I
PI control	$K_u/3.2$	$2.2 P_u$

Tab. 7.2 - Nastavení regulátoru Tyreus-Luyben

Jako poslední krok jsme přepočítali PI regulátory na PS s uvažovanou vzorkovací frekvencí 20kHz. Ověření správnosti přepočtu bylo ověřeno modelem s PS regulátory.

7.2.1 Další metody zkvalitnění regulace elektrodynamického pohonu

Jedním z problémů elektrodynamického pohonu je široké spektrum rychlostí, jakými se pohon může pohybovat. Vzhledem k tomu, že rychlost počítáme numerickou derivací polohy, dostáváme při malých rychlostech malé změny signálu polohy a po dělení časem je velké nebezpečí zašumění signálu. Při malých rychlostech je vhodné zvýšit interval časovače a tedy prodloužit čas mezi jednotlivými výpočty polohy. Za delší čas lze očekávat vyšší změnu polohy a tedy menší nebezpečí vzniku šumu. Toto primitivní odstranění šumu dovoluje vyšší zesílení rychlostního regulátoru.

Další možností jak zkvalitnit regulaci pohonu je využití feedforwardů, tedy dopředné regulační smyčky. Konvenční regulátory totiž fungují na základě

velikosti chyby, respektive rozdílu žádané a aktuální veličiny. Nejprve musí tedy dojít k vytvoření chybové veličiny, aby regulace začala pracovat. Feedforwardy v přeneseném slova smyslu lze ale zahrnout do regulace pomocí kaskády regulačních smyček následovně. Pokud budeme pohonu v polohové zpětné vazbě určovat nejen žádanou polohu ale i žádanou rychlost, získáváme tak další vstupní signál, který lze využít v regulaci. Navíc kaskádu regulačních smyček PS regulátorů si lze představit podobně jako synchronní číslicový sekvenční obvod. Situaci budeme demonstrovat na rozjezdu pohonu.

V prvním taktu vyhodnocuje rozdíl žádané polohy, v dalším se provede výpočet proporcionální regulace polohy a signál vstupuje do regulace rychlosti. Dalším taktem se provádí výpočet rozdílu rychlosti, v dalším taktu výpočet regulátoru rychlosti, v dalším odečet proudu a v dalším regulace proudu a zápis plnění do registru PWM. Na tomto modelovém případě trval přenos žádané změny polohy do výstupu proudového regulátoru pět taktů. Výhoda feedforwardu je v tom, že v podstatě zavádíme další signál na vstup regulátoru, který má za cíl vyvolat „okamžitou“ odezvu na změnu vstupní veličiny. Tedy informaci, že na vstupním signálu došlo k chybě, přenášíme do nižších úrovní regulační smyčky a tím urychlujeme odezvu na chybu.

Pokud zavedeme feedforward do proudového regulátoru, zkrátíme tím dobu v našem modelovém příkladu o čtyři takty. Feedforwardy se využívají dva, feedforward proudu, jako vstup do proudového regulátoru a feedforward rychlosti, jako vstup regulátoru rychlosti.

Tento princip by se měl kladně projevit při rychlých změnách žádané polohy a také při reverzaci pohonu.

Jako dopředné regulátory se typicky využívají pouze proporcionální regulátory^[11]. Dopředné regulátory sice zvyšují dynamiku pohonu, ale mohou mít za následek špatné chování pohonu v úvratích z hlediska regulace polohy.

Dále je možné využít adaptivní regulátory. Adaptivní regulátory fungují tak, že nad regulační smyčkou, která provádí vlastní regulaci, je ještě adaptivní smyčka. Adaptivní smyčka dlouhodobě vyhodnocuje regulační smyčku a upravuje parametry regulátoru regulační smyčky. Implementace adaptivní regulace by byla

v signálovém procesoru dosti obtížná, proto plánujeme, v případě potřeby, „pseudoadaptivní“ regulaci. U polohového servopohonu požadujeme dojetí do požadované polohy bez překmitu. Nedojetí do krajní polohy je obvykle způsobeno zátěžnou silou. Při nedojetí do žádané polohy je rozdíl vyhodnocen a jsou upraveny parametry rychlostního regulátoru.

7.2.2 Nastavení regulátorů

Při nastavení proudové zpětné vazby vycházíme z modelu elektrodynamického pohonu Obr 7.1. Pro další úvahu neuvažujeme nelineární blok reprezentující H můstek, ten můžeme vzhledem k vysokému spínacímu kmitočtu tranzistorů zanedbat.

Při použití vztahů,

$$(7.14) \quad T_m = \frac{m \cdot R}{K_f \cdot K_e}$$

$$(7.15) \quad T_e = \frac{L}{R}$$

$$(7.16) \quad \Omega_m = \frac{1}{\sqrt{T_m \cdot T_e}}$$

$$(7.17) \quad \zeta_m = \frac{m \cdot R}{K_f \cdot K_e}$$

lze přenos motoru vyjádřit rovnicí

$$(7.18) \quad F_{Mo} = \frac{\frac{m}{K_e \cdot K_f} \cdot s}{\frac{s^2}{\Omega_m^2} + \frac{2\zeta}{\Omega_m} + 1}$$

a rovnicí PI regulátoru rovnicí

$$(7.19) \quad R = Kp_i \frac{Tn_i \cdot s + 1}{Tn_i \cdot s}$$

a konečně výsledný přenos otevřené regulační smyčky je popsán rovnicí

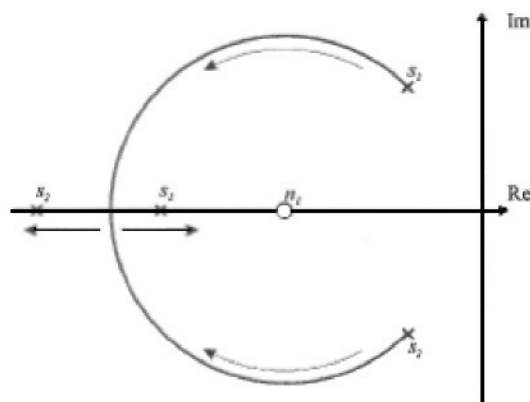
$$(7.20) \quad F_{i0} = R \cdot F_{M0} = Kp_i \frac{Tn_i \cdot s + 1}{Tn_i \cdot s} \cdot \frac{\frac{m}{K_e \cdot K_f} \cdot s}{\frac{s^2}{\Omega_m^2} + \frac{2\zeta}{\Omega_m} + 1}$$

Po úpravách dostáváme kořeny otevřené smyčky ve tvaru

$$(7.21) \quad s_{1,2} = -\zeta_m \Omega_m \pm \sqrt{-\Omega_m^2 + \zeta_m^2 \Omega_m^2}$$

Kořeny otevřené regulační smyčky vycházejí komplexně sdružená čísla a nula přenosu se rovná $-\frac{1}{Tn_i}$.

Po uzavření regulační smyčky se s rostoucím zesílením Kp_i začnou póly pohybovat po kružnici se středem v nule čitatele.



Obr. 7.2 – Póly otevřené a uzavřené proudové regulační smyčky a jejich trajektorie při rostoucím zesílení

Pak se jeden pól začne blížit nule čitatele a druhý směřuje k nekonečnu, čímž se jeho vliv potlačí.

Po dosazení parametrů z Tab. 9.2 se kořeny otevřené smyčky rovnají $s_{1,2} = -0,5 \pm 495i$ zatímco kořeny uzavřené smyčky se rovnají $s_1 = -1005$ a $s_2 = -221917$.

Při nastavení rychlostního regulátoru můžeme vzhledem k předchozímu nastavení uvažovat přenos pohonu v proudové regulační smyčce jako jednotkový. Tím se celý výpočet značně zjednoduší. Přenos otevřené regulační smyčky pak můžeme vyjádřit rovnicí

$$(7.22) \quad F_{\omega 0} = R \cdot 1 \cdot \frac{K_f}{m \cdot s} = Kp_{\omega} \frac{Tn_{\omega} \cdot s + 1}{Tn_{\omega} \cdot s} \cdot \frac{K_f}{m \cdot s}$$

Dvojnásobným pólem je $s_{1,2} = 0$ zatímco nula přenosu má hodnotu $-\frac{1}{Tn_{\omega}}$. Po uzavření zpětné vazby dostáváme tvar

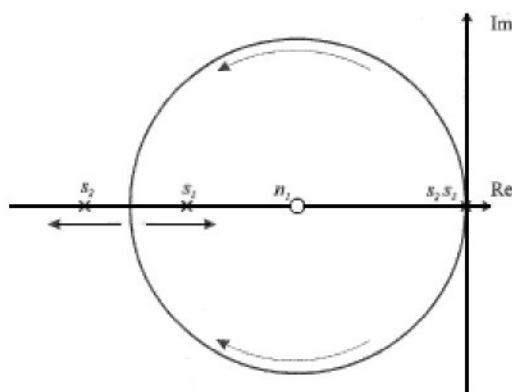
$$(7.23) \quad F_{\omega} = \frac{K_f \cdot Kp_{\omega} (Tn_{\omega} \cdot s + 1)}{Tn_{\omega} \cdot m \cdot s^2 + K_f \cdot Kp_{\omega} \cdot s + K_f \cdot Kp_{\omega}}$$

Kde kořeny charakteristické rovnice dostáváme ve tvaru,

$$(7.24) \quad s_{1,2} = \frac{-K_f Kp_{\omega} - \sqrt{(K_f Kp_{\omega})^2 - 4 \cdot Tn_{\omega} \cdot m \cdot K_f Kp_{\omega}}}{2 \cdot Tn_{\omega} \cdot m}$$

a při splnění nerovnice (7.25) přecházejí komplexně sdružené kořeny na reálné.

$$(7.25) \quad \frac{K_f \cdot Kp_{\omega} \cdot Tn_{\omega}}{m} \geq 4$$



Obr. 7.3 – Póly otevřené a uzavřené rychlostní regulační smyčky a jejich trajektorie při rostoucím zesílení

Po dosazení dostáváme kořeny $s_1 = -1$ a $s_2 = -98799$ přičemž kořen s_1 se blíží nule čitatele.

Při nastavení polohové regulační smyčky vzhledem k integračnímu charakteru motoru postačí pouze proporcionální regulátor. Přenos otevřené smyčky pak lze vyjádřit rovnicí,

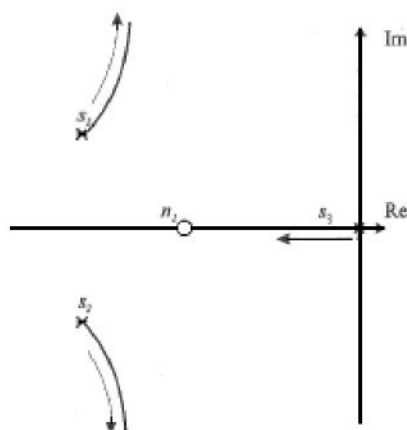
$$(7.26) \quad F_{p0} = Kp_p \cdot \frac{K_f \cdot Kp_\omega (Tn_\omega \cdot s + 1)}{Tn_\omega \cdot m \cdot s^2 + K_f \cdot Kp_\omega \cdot s + K_f \cdot Kp_\omega} \cdot \frac{1}{s}$$

Je vidět, že v případě otevřené smyčky jsou kořeny charakteristické rovnice komplexně sdružené $s_{1,2} = -296 \pm 105i$ a $s_3 = 0$, který vzniká integrací rychlosti na polohu. Rovnice uzavřené smyčky má tvar

(7.27)

$$F_p = \frac{Kp_p \cdot K_f \cdot Kp_\omega (Tn_\omega \cdot s + 1)}{Tn_\omega \cdot m \cdot s^3 + Tn_\omega \cdot K_f \cdot Kp_\omega \cdot s^2 + (Kp_p \cdot K_f \cdot Kp_\omega \cdot Tn_\omega + K_f \cdot Kp_\omega) \cdot s + Kp_p \cdot K_f \cdot Kp_\omega}$$

Řešením charakteristické rovnice dostáváme komplexně sdružené kořeny $s_{1,2} = -279 \pm 150i$ a kořen $s_3 = -34.5$.



Obr. 7.4 – Póly otevřené a uzavřené regulační smyčky a jejich trajektorie při rostoucím zesílení

Při odvození polohové smyčky jsme vycházeli ze zjednodušení jednotkového přenosu uzavřené proudové regulační smyčky. Zdrojem dalších nepřesností je linearizace matematického modelu. Posledním zdrojem chyb je použití diskrétních regulátorů nezbytných z důvodu číslicového řízení signálovým procesorem.

8 Návrh funkčního modelu elektrodynamického pohonu

Při návrhu jsme vyšli z experimentů na laboratorním modelu řízeném mikrokontrolérem ADuC a z výsledků matematických simulací. Další verze elektrodynamického pohonu má za cíl odstranit nevýhody předchozího funkčního modelu pohonu založeného na analogovém proudovém zdroji a primitivní regulační struktuře. Systém je řízen dostatečně výkonným procesorem, výkonový člen je realizován H-můstkem a celý systém se svou regulační strukturou a funkcí blíží komerčně vyráběným servopohonům.

8.1 Vývoj hardwaru elektrodynamického pohonu

Vývoj hardwaru se v podstatě rozpadá na dva na sobě závislé moduly, modul řídicí elektroniky a modul výkonové desky.

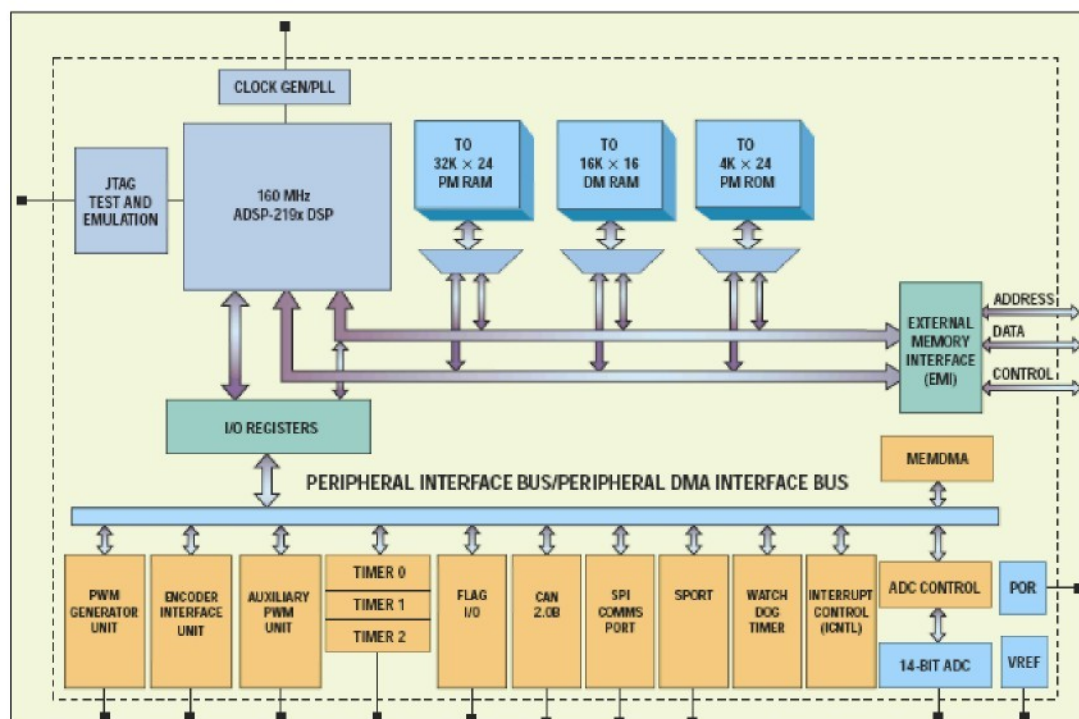
Pro realizaci modulu řízení elektrodynamického pohonu musel být vybrán dostatečně výkonný signálový procesor, který svými periferiemi umožňuje řízení pohonů. Využití specializovaného procesoru má základní přínos v kompaktnosti zařízení a minimu externí elektroniky. Kvůli náročnosti návrhu plošného spoje a ceně kusové výroby byl použit hotový produkt EZ-KIT s ADSP 21992^[24] Obr. 8.1 od společnosti Analog Devices.

Oproti tomu výkonový modul byl navržen individuálně tak, aby byl schopný snadno komunikovat s řídicím modulem a zároveň, aby samotný hardware ošetřoval základní chybové stavy bez zásahu řídicí elektroniky.

8.1.1 Řídicí deska ADSP 21992

Signálový procesor ADSP 21992 poskytuje dostatečný výkon a specializované periferie pro řízení pohonů a aplikace typu řízení výkonu. Díky 160MHz taktu jádra a 80MHz perifernímu taktu lze docílit vysoké spínací frekvence šířkově pulzní modulace. Pro převod analogových signálů lze využít dva 4x multiplexované analogově číslicové převodníky. Pro řízení chodu programu nebo

pro generování signálu pro periferie lze využít tři 32 bitové časovače a 16 programově řízených vstupně výstupních flagů. Další uživatelsky využitelnou periferií je rozhraní pro inkrementální čidlo polohy. Pro komunikaci lze využít CAN sběrnici ve standardu 2.0B nebo UART.



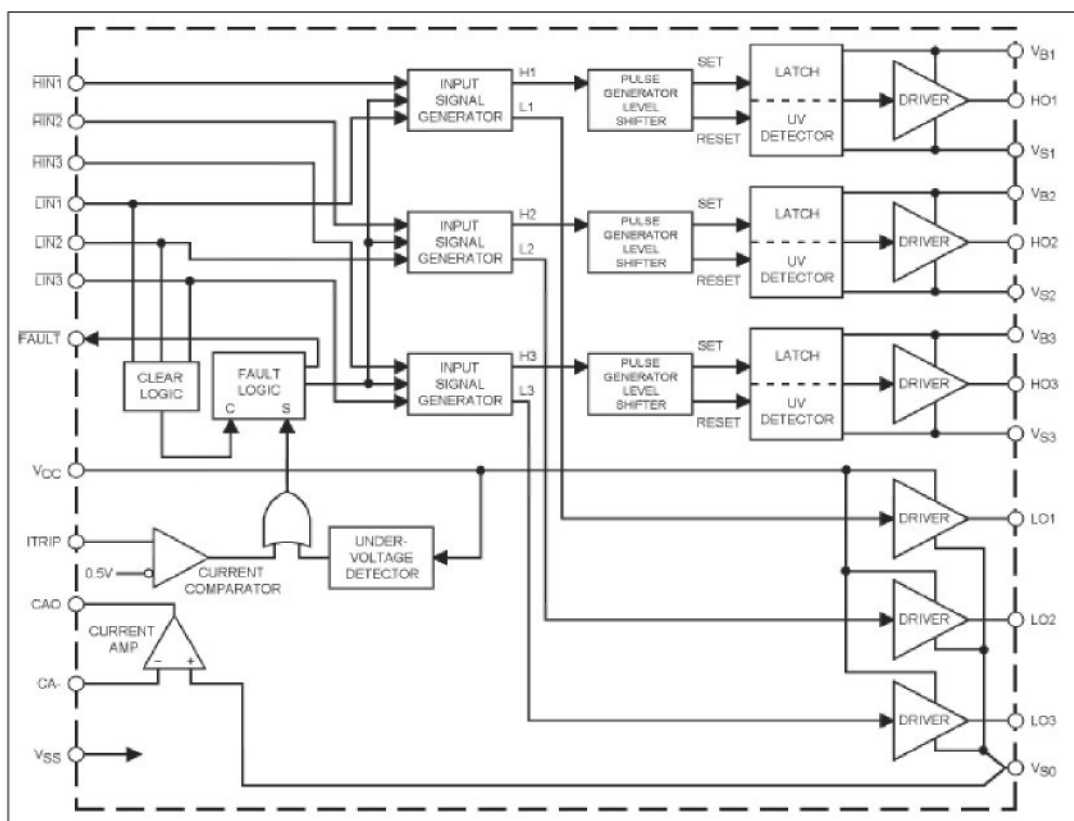
Obr. 8.1 - Blokové schéma procesoru ADSP 21992

Vývojový EZ KIT Lite ADSP 21992 zajišťuje napájení procesoru. Jsou na něm například umístěny diferenciální budiče pro CAN, antialiasingové filtry pro analogově číslicové převodníky a D/A převodník. Hlavní předností je ovšem možnost ladění softwaru po USB z programovacího prostředí VisualDSP++, Obr. 8.5, které nám dovoluje využít krokování, nastavení breakpointů, vyčítání jednotlivých registrů a podobně.

8.1.2 Výkonová deska IR 2130

Srdcem výkonové desky je integrovaný obvod IR 2130^[29], což je integrovaný budič MOSFETových tranzistorů či IGBT tranzistorů. Integrovaný obvod Obr. 8.2 umožňuje pomocí zpětnovazebního zesilovače a snímacího rezistoru získat informaci o protékajícím proudu. Zásadní výhodou je hlídání nadproudu, jehož

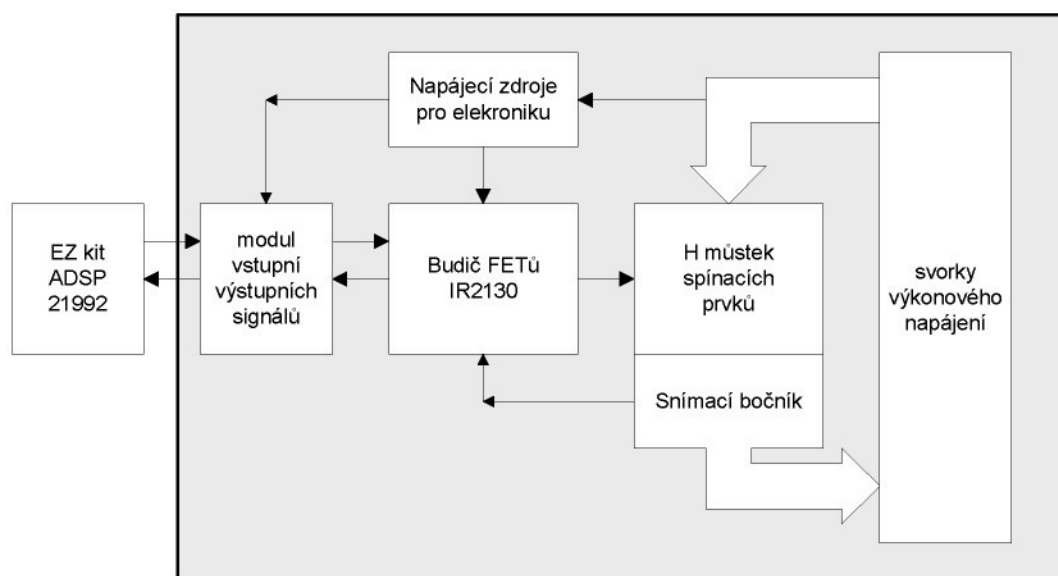
hodnota je nastavitelná externím rezistorovým děličem. Obvod umožňuje buzení gatů od 10V do 20V proudem až 420mA. Další výhodou tohoto obvodu je integrovaný deathtime, který zajišťuje čas pro zotavení nevodivého stavu spínacích součástek. Délku deathtimů nelze ovšem přestavit externími součástkami. Pro buzení horních gatů tranzistorů je využito plovoucích zdrojů s externím kapacitorem. Obvod kontroluje vlastní napájecí napětí s podpěťovou ochranou, která rovněž vyvolá chybový výstup „Fault“.



Obr. 8.2 - Blokové schéma budiče fetů IR 2130

Protože jsme nechtěli zatěžovat výstupy PWM generátorů a chtěli mít definovaný provozní stav při náběhu napájecích zdrojů, je vstupům IR 2130 předřazen obvod 74HCT04, který slouží jako impedanční přizpůsobení.

Jako spínacích prvků bylo využito běžných MOSFET tranzistorů IRFZ 44, které mají nízký $R_{ds(on)}$, V_{dss} až 60V a trvalý proud 36A v pouzdře TO220. Zpětně vodivá dioda je umístěna přímo v pouzdru tranzistoru.



Obr. 8.3 - Blokové schéma výkonové desky

Pro rychlé vypnutí je zapotřebí rychle odčerpat náboj z parazitní kapacity. Snížení hodnoty tohoto náboje lze docílit snížením napětí U_{GS} na hodnotu, která uvede tranzistor do spolehlivě vodivého stavu, ale při které nenastane hluboká saturace. To ovšem nelze docílit snížením napájecího napětí obvodu IR 2130, protože by už reagovala podpěťová ochrana. Proto bylo využito paralelní zapojení Zenerovy diody s rezistorem R20, pro omezení napětí, a Schottky diody, pro rychlý odvod náboje, Schéma 8.1.

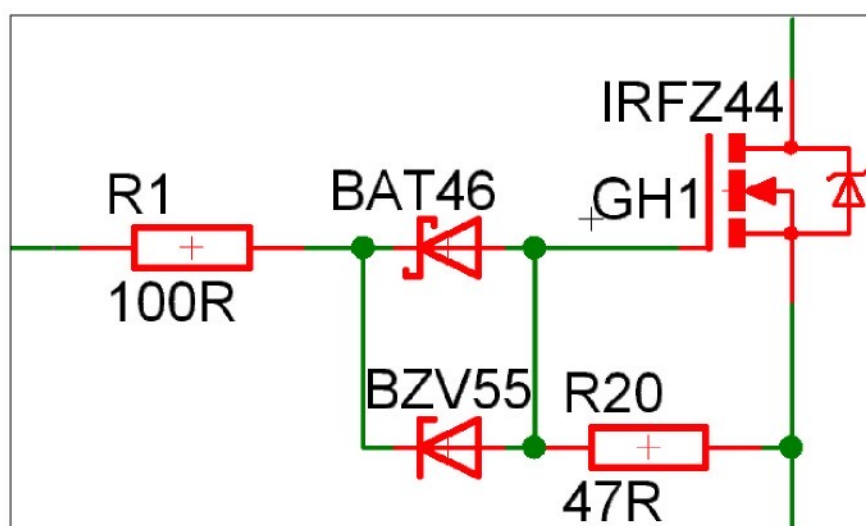


Schéma 8.1 - Přizpůsobení budiče gatům mosfetových tranzistorů

Přes hlavní snímací rezistor proudu je paralelní rezistorový dělič, který slouží nastavení prahu nadproudového omezení. Tento dělič je také využit jako vstup do zesilovače proudu. Proto za děličem následuje dolní propust, která omezuje proudové špičky vlivem indukčnosti zátěže, Schéma 8.2. Další dolní propust následuje na výstupu proudového zesilovače.

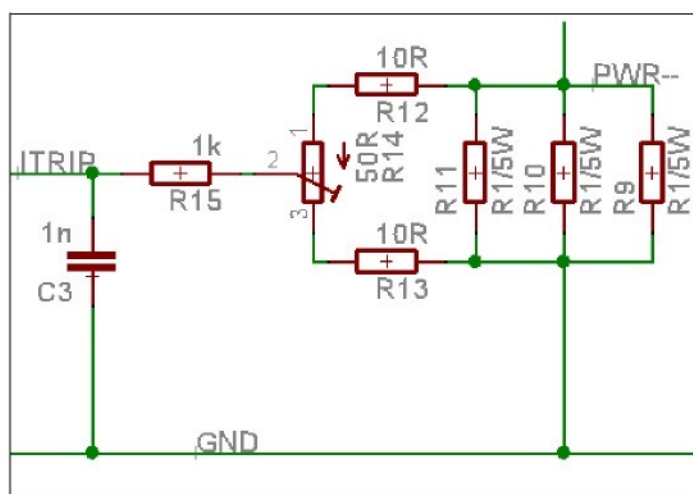


Schéma 8.2 - Modul snímacího rezistoru a dolní propusti

Klíčovým místem v návrhu desky plošného spoje výkonové desky je indukčnost cest na plošném spoji protékána výkonovými proudy. Kritická je otázka správného zemnění desky, aby se zamezilo průnikům modulačního kmitočtu PWM do analogových signálů.

Indukčnost přímého plošného vodiče^[13] nepodloženého vodivou plochou lze určit pomocí vztahu (8.1).

$$(8.1) \quad L = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{2\pi} \cdot l \cdot \left(\ln \left(\frac{2 \cdot l}{t + w} \right) + 0,5 + 0,2235 \cdot \frac{t + w}{l} \right)$$

Oproti tomu indukčnost přímého plošného vodiče nad vodivou plochou odpovídá vztahu (8.2).

$$(8.2) \quad L = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{1 + \frac{3h}{2w}} \cdot l \cdot \frac{h}{w}$$

Z důvodu velké strmosti změny proudu (8.3) je na vodiči indukováno napětí úměrné indukčnosti vodiče, proto se snažíme cesty plošného spoje protékané rychlými změnami proudu navrhnout co nejkratší.

$$(8.3) \quad U_i = L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Rychlé spínání je ale nezbytné pro malé výkonové ztráty na výkonových součástkách, v případě našeho tranzistoru změna proudu řádově 50A během 100ns. Na vodiči o indukčnosti 2μH se indukuje napětí 1kV.

V obou případech je dominantním parametrem ovlivňujícím indukčnost délka vodiče.

Dalším důležitým parametrem je dovolený trvalý proud procházející vodičem a velikost a doba trvání zkratového proudu. Ten souvisí s odporem vodiče (8.4)

$$(8.4) \quad R = \rho \frac{l}{t \cdot w}$$

a tedy s výkonovou ztrátou na něm a dovoleným oteplením desky plošného spoje. Na základě těchto požadavků určíme správnou šířku spoje. V praxi můžeme využít monogramů pro příslušné materiály a tloušťky plošného vodiče.

Pro spolehlivou funkci spínacích součástek je nezbytné zajistit odpovídající chlazení. Je-li v jednotce materiálu generováno množství tepla q , pak rozložení teploty v homogenním prostředí^[31] odpovídá rovnici (8.5).

$$(8.5) \quad \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \cdot \operatorname{div} \operatorname{grad} T + \frac{q}{\rho \cdot c}$$

Poměry na výkonové součástce připevněné na chladiči jsou ale komplikovanější vlivem několika odporů na rozhraní jednotlivých vrstev a také použitím různých

materiálů. Pro zjednodušený výpočet odvodu tepla můžeme využít elektrického ekvivalentního schématu.

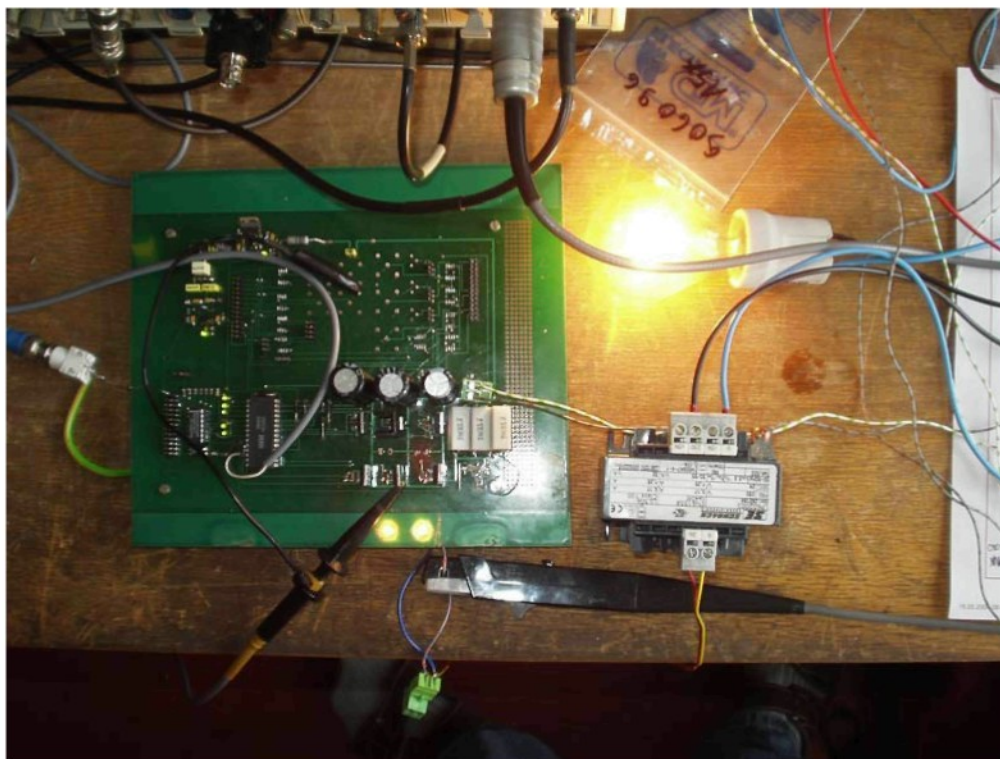
$$(8.6) \quad R_{ja} = R_{jc} + R_{ch} + R_{ha} = \frac{T_j - T_a}{P_z}$$

Rovnice platí pro ustálený stav a proto v ní nejsou zahrnuty dílčí tepelné kapacity jednotlivých vrstev. Výsledný tepelný odpor čipu polovodiče vůči okolnímu prostředí se skládá z odporu čipu vůči pouzdru součástky, odporu součástky a chladiče a chladiče a okolního prostředí. Odpor čip-pouzdro je určen výrobcem součástky. Odpor pouzdro-chladič je určen montáží, použitím izolační podložky a druhem teplovodivé pasty. Odpor chladič-okolí je při obvyklém návrhu neznámá. Podle vypočtené hodnoty a druhu pouzdra vybereme vhodný chladič z katalogu podle (8.7).

$$(8.7) \quad R_{ha} = \frac{T_j - T_a}{P_z} - R_{jc} + R_{ch}$$

$$(8.8) \quad R_{ha} = \frac{175 - 60}{10} - 1,5 = 10^\circ\text{C}/\text{W}$$

Výrobce udává maximální hodnotu čipu 175°C , teplotu okolí volíme 60°C . Střední ztrátový výkon určíme na přibližně 10W , odpor čip-pouzdro a pouzdro-chladič výrobce stanovil na $1,5^\circ\text{C}/\text{W}$. Použitý chladič tedy musí mít odpor menší než $10^\circ\text{C}/\text{W}$.



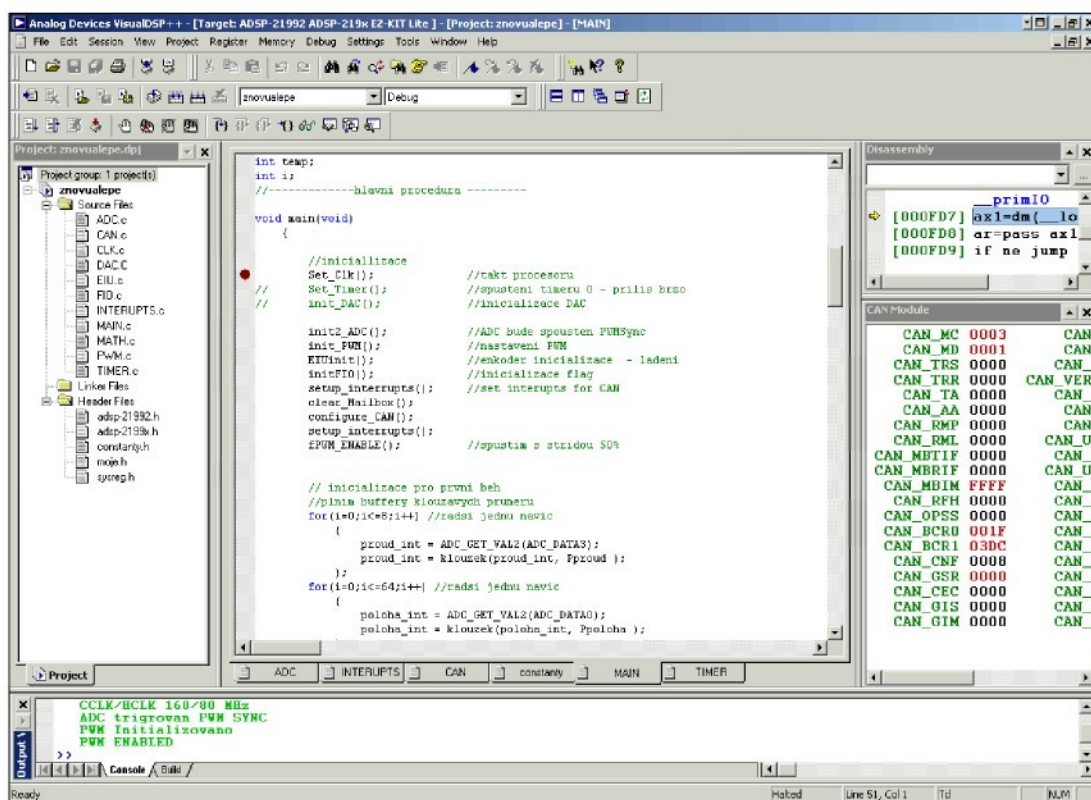
Obr. 8.4 - Oživení a první měření na výkonové desce

Vstupní signál z obdélníkového průběhu nestejné střídavy vstupuje do budiče fetů IR2130. Výstupní střídavé napětí z H-můstku napájí sekundární stranu transformátoru 230/24V, který simuluje indukční zátěž vinutí aktuátoru. Připojená žárovka 230V/25W velmi jasně demonstruje funkci zařízení.

Pro napájení silové desky se předpokládá napětí 48V stejnosměrných. Napájecí napětí pro elektronické obvody je odvozeno z tohoto napájení a je vyrobeno pomocí Zenerovy diody s předřadným rezistorem a integrovanými stabilizátory 78xx. Pro napájení operačních zesilovačů je na desce invertující měnič -5V.

8.2 Vývoj softwaru pro digitální signálový procesor

Pro vývoj softwaru jsme využili univerzální vývojové prostředí pro signálové procesory Analog Devices VisualDSP++ Obr. 8.5. Toto prostředí umožňuje využívat tři základních programovacích prostředí, Asembleru, C a C++. My jsme vzhledem k přehlednosti kódu zvolili jazyk C.



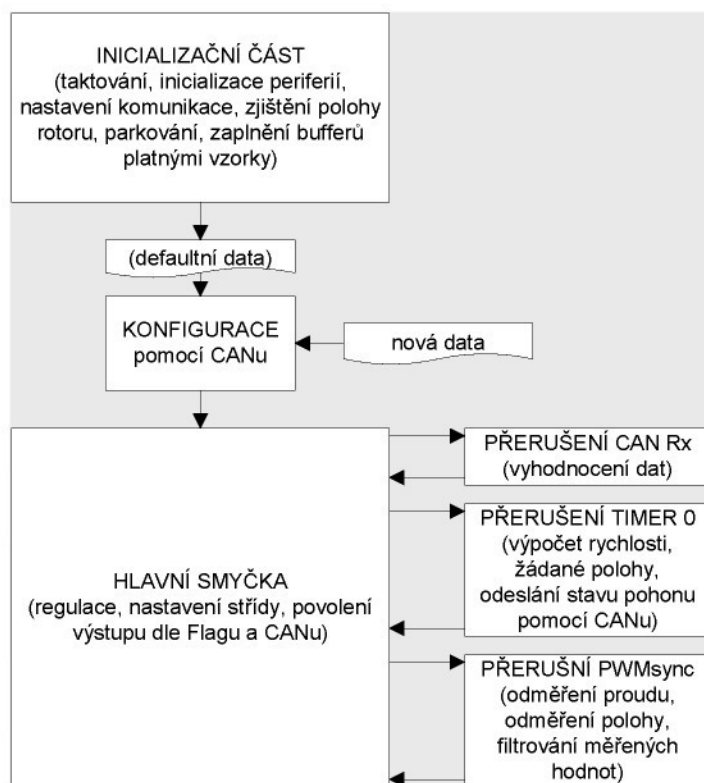
Obr. 8.5 - Rozhraní vývojového prostředí VisualDSP++

Programování procesoru v podstatě spočívá v čtení a zápisu do registrů, které jsou umístěny na stránkách dle kategorie (např. PWM, systémové a další). Vlastní řídicí algoritmus vyhodnocuje naměřená data a vypočítává nové hodnoty registrů.

Na periferie se přistupuje jako na externí paměť pomocí stránky a adresy^[19]. K přístupu slouží funkce „*sysreg_write(sysreg_IOPG, stránka)*“ pro nastavení stránky, „*io_space_write(registr, hodnota)*“ pro zápis do registru a pro čtení funkci „*io_space_read(registr)*“, která vrací hodnotu registru. V každém případě je potřeba VŽDY správně nastavit stránku. Při vývoji softwaru je užitečným pomocníkem ve VisualDSP++ záložka „registers“, kde lze zobrazit jednotlivé registry. Máme tak snadnou kontrolu nad tím, zda čteme to, co požadujeme. Načtenou hodnotu registrů je možné vypsát do konzole pomocí standardních funkcí terminálového výstupu. Po připojení souborů „adsp-21992.h“ a „adsp-2199x.h“ můžeme přistupovat k registrům pomocí symbolických jmen.

Po překladu zdrojového kódu v jazyce C a C++ máme možnost kontrolovat chod programu v okně „disassembly“, kde je převeden do assembleru.

Principiálně software funguje podle Obr. 8.6 tak, že po inicializační části běží nekonečný cyklus hlavní smyčky, kde je vypočítávána regulace a z ní jsou obsluhovány přicházející přerušení. Jednotlivá přerušení mají přiděleny různou prioritu.



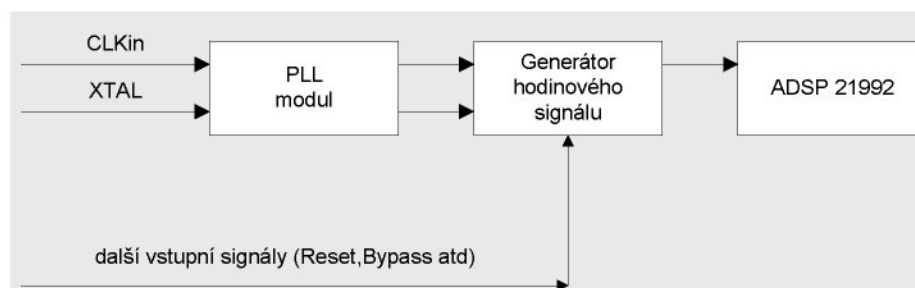
Obr. 8.6 - Blokové schéma řídicího programu

Nejvyšší přerušení mají přichází data po CANu Obr. 8.15, pro okamžitou odezvu na nadřazený systém. Nižší prioritu má přerušení Timeru0 Obr. 8.17, kde je vypočítávána rychlost, odesílána data po CANu a vypočítávána žádaná poloha. Nejnižší prioritu má PWM_sync Obr. 8.16, kde jsou odměřována data. Vnořená přerušení nejsou povolena. Ve smyčce hlavního programu je vypočítávána regulační smyčka pomocí naměřených a vypočtených dat z přerušení a PWM sync. Abychom zkrátili dobu trvání přerušení Timeru0, je vnitřní struktura škálována softwarovým čítačem. V sudém přerušení počítáme rychlost a v lichém

odesíláme data po CANu. Novou žádanou polohu generujeme v každém přerušení, aby průběh žádané hodnoty byl co nejhladší a nejspojitéjší.

8.2.1 Inicializace procesoru

Pro využití výkonu procesoru ADSP 21992 je nutné procesor nataktovat Obr. 8.7 na hodinovou frekvenci jádra 160MHz. Z ní je odvozena maximální periferní hodinová frekvence 80MHz. To je provedeno uživatelskou funkcí *Set_Clock()*. Nejprve je nutné nastavit u PLL takzvaný „bypass mód“, tedy PLL není v činnosti, pak se modifikuje PLL registr a tím se změní „násobič“. Po testování zavěšení PLL můžeme opustit „bypass mód“ a využít nové hodinové frekvence procesoru.



Obr. 8.7 - Zjednodušené blokové schéma hodinového generátoru

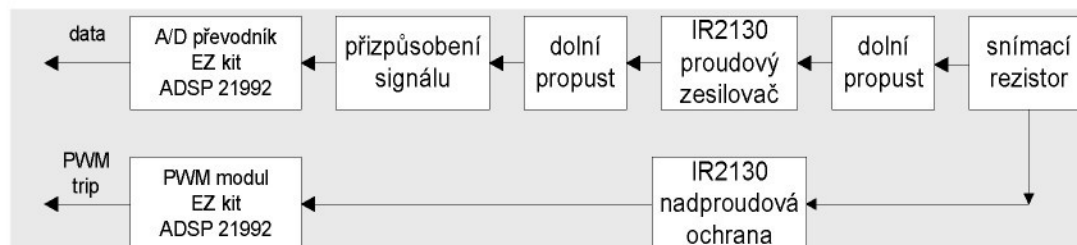
Správné nastavení zejména periferní hodinové frekvence je rozhodující pro správné časování dalších zařízení jako AD převodníků a PWM funkcí.

8.2.2 Realizace proudové zpětné vazby

Realizace proudové zpětné vazby se vlastně skládá ze tří prvků. Odměření proudu, vlastního proudového regulátoru a převodu výstupu proudového regulátoru do PWM Obr. 8.8.

Pro odměření proudu jsme využili jednoho ze dvou 14 bitových, 20MHz ADpřevodníku, který je schopen pracovat se vstupním napětím $\pm 1V$. Vlastní analogový výstup proudového zesilovače je realizován v budiči FETů, kde lze

externími rezistory dostavit zesílení^[30]. Po analogovém přizpůsobení signálu ho odměřujeme pomocí kanálu ADC0^[22].

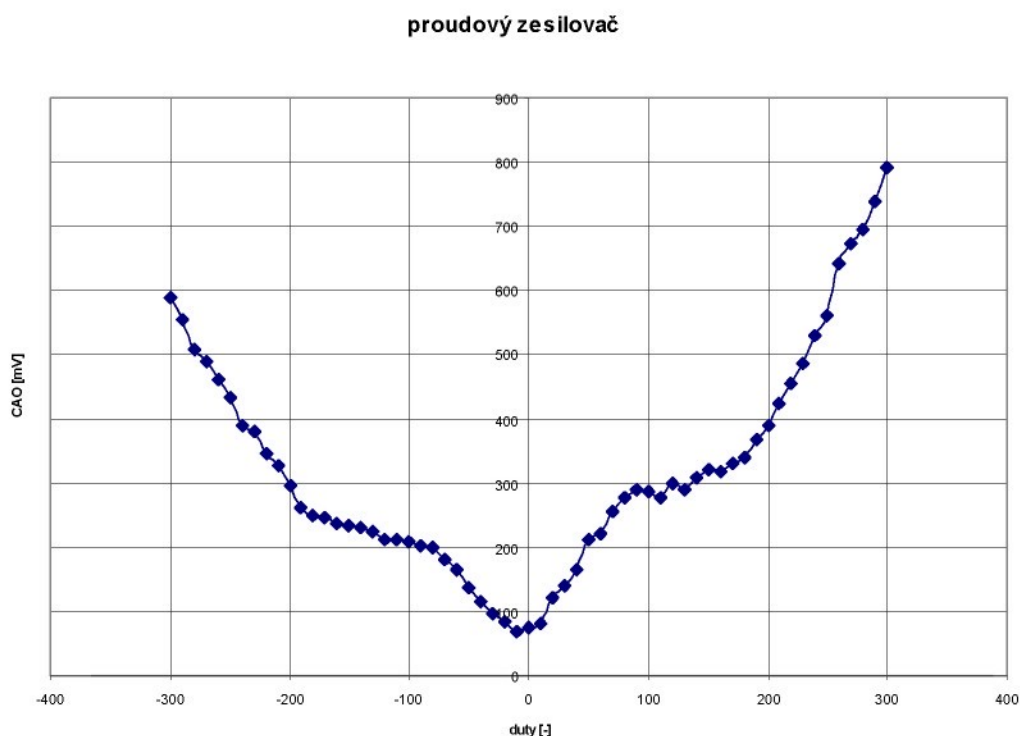


Obr. 8.8 - Blokové schéma odměřování proudu a vinutí v případě nadproudu

Před vlastním odměřováním je nutné inicializovat převodník. V našem případě jsme zvolili simultaneous sampling a spouštění od PWM_SYNC signálu. Spouštění od PWM_SYNC má tu výhodu, že odměřujeme proud ve vždy jasně definovanou dobu po naplnění PWM_DUTY. To je výhodné vzhledem ke tvaru proudu a přechodovým jevům na cívce. Vlastní měření probíhá v obslužné rutině přerušení od PWM_SYNC.

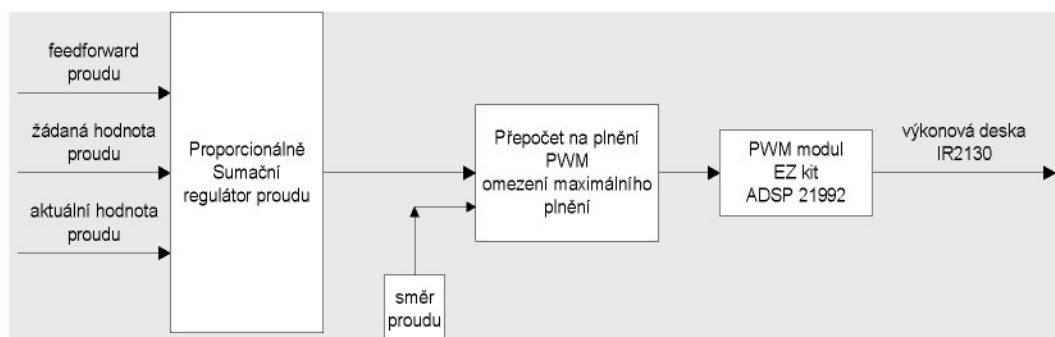
Vlastní AD převodník vrací celočíselnou hodnotu ve dvojkovém doplňku. Naměřené hodnoty jsou dále zpracovány klouzavým průměrem z osmi vzorků, výstup filtru je potom přepočten na Ampéry.

Proudový zesilovač ovšem má jiné zesílení pro kladný a záporný směr proudu Obr. 8.9, takže se musí pracovat s dvěma přepočtovými rovnicemi.



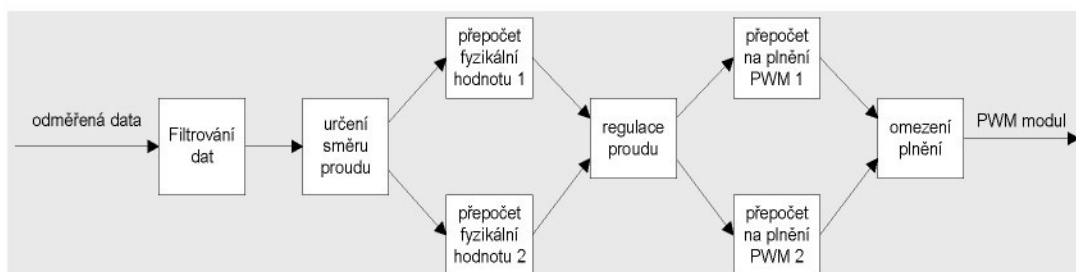
Obr. 8.9 - Nesymetrie proudového zesilovače

Dalším problémem je určení směru proudu. Výstup proudového zesilovače je vždy kladný. Nezbyvá tedy než estimovat směr proudu z modelu systému. V podstatě jsou dvě základní možnosti jak určit směr proudu. Při změně směru pohybu máme jistotu, že se změnil směr proudu. Jenže zde vlastně informaci dostáváme až po překonání setrvačných hmot a tím si snižujeme nepříjemně propustné pásmo proudového regulátoru. Druhou možností je předpoklad, že při změně PWM_DUTY (plnění) z kladného do záporného se nám rovněž mění okamžitě i směr proudu. Tento předpoklad sice není teoreticky správný, ale vzhledem k malé indukčnosti cívky a malé odměřené hodnotě proudu při změně plnění si jej můžeme dovolit. V tomto případě nám nahrává i pásmo necitlivosti proudu, tedy při malé hodnotě proudu, ať kladné či záporné, nedojde ke změně polohy motoru.



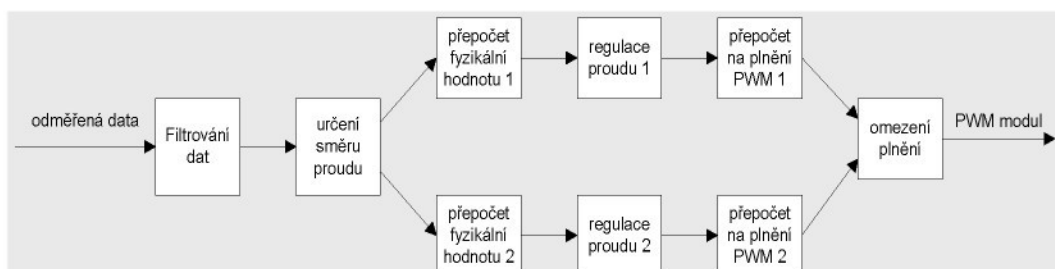
Obr. 8.10 - Blokové schéma proudové regulace

Proudový regulátor je realizován jako proporcionálně sumační Obr. 8.10. Posledním blokem je převod výstupu proudového regulátoru na plnění. V podstatě máme na výstupu hodnotu, kterou je potřeba přepočíst na takovou hodnotu plnění PWM_DUTY, abychom dostali požadovanou hodnotu proudu.



Obr. 8.11 - Blokové schéma zpracování dat aktuálního proudu

Opět pracujeme s dvěma převodními rovnicemi pro kladný a záporný směr proudu. Tím se nám regulace v podstatě rozpadá na dvě větve, na větev kladného proudu nahoře a větev záporného proudu dole. Jednotlivým prvkem je proudový regulátor se společným nastavením jak pro kladný tak pro záporný směr proudu. Využití dvou nezávislých proudových regulátorů v každé větvi podle Obr. 8.12 by bylo výhodné například při kompenzaci tíhové síly na rotor při vertikální montáži.



Obr. 8.12 - Blokové schéma zpracování dat aktuálního proudu při vertikální montáži

Všechny převodní rovnice byly získány na základě měření a experimentů na zařízení ve stavu nakrátko, při přímém zápisu hodnoty do PWM_DUTY registru. Tedy pro jednotlivá plnění byly odměřeny jak hodnoty proudu cívkou tak i hodnoty napětí na výstupu proudového zesilovače, při zablokované „rotorové“ cívce.

Před vlastním zápisem do PWM_DUTY registru je nutné ovšem PWM inicializovat a spustit. Nedůležitějším registrem je PWM0_TM, kde se zadává perioda PWM v závislosti na hodinové frekvenci periferního hodinového signálu. PWM0_TM může být volena podle různých parametrů, my jsme zvolili 20kHz, protože je již mimo slyšitelné spektrum a přitom je dostatečně malá, aby se příliš neuplatnil parazitní vliv death-time.

Dalším kanálem je PWM0_DT, kde se zařazují death-time časy potřebné k zotavení součástek. U nás však jsou již řešeny v HW, proto jsme žádné další nepřidávali.

Dále se povolují jednotlivé kanály PWM, nastavuje chování low side driverů, možnosti aktualizace PWM registrů a další parametry.

V závislosti na nastaveném „update módu“ a „PWM0_TM“ lze zapisovat hodnoty do PWM_DUTY registrů, v našem případě je hodnota zápisu možná od -1000 do 1000.

Vzhledem k proudovému omezení na výkonové desce nastavené na cca 10A, je nutné ještě před zápisem do PWM_DUTY registrů provést omezení na hodnotu cca 300. Tedy pro hodnoty vyšší než 300 omezujeme duty = 300 a pro hodnoty menší -300 na hodnotu duty = -300. Tím předejdeme vyvolání proudového omezení při normálním provozním stavu. Po odladění regulačních algoritmů lze tuto hodnotu zvýšit, aby bylo možné využít celého regulačního rozsahu -1000/1000.

8.2.3 Realizace rychlostní zpětné vazby

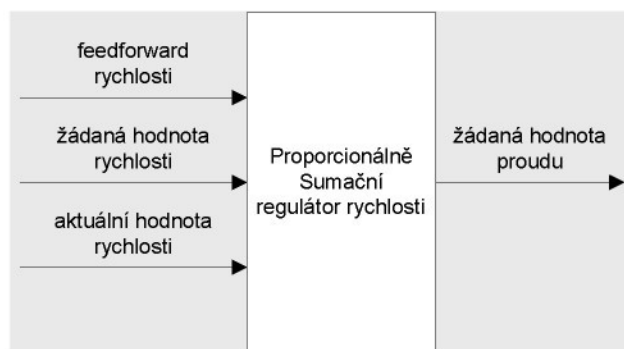
Rychlostní zpětná vazba se v podstatě skládá ze dvou bloků. Výpočtu či měření aktuální rychlosti a proporcionálně sumačního rychlostního regulátoru Obr. 8.13. Vzhledem k tomu, že náš model pohonu je vybaven čidlem polohy, je třeba rychlost určit numerickou derivací.

Vlastní výpočet rychlosti probíhá v dalším přerušení tentokrát vyvolané Timerem0. Jistěže by šlo využít i přerušení od PWM_SYNC, ale to by znamenalo prodloužení obslužné rutiny PWM_SYNC a zavedení většího zpoždění v regulaci proudu. Proto je využito dalšího přerušení. Navíc se dá perioda vhodně modifikovat pomocí několika speciálních registrů, bez dalšího vlivu na PWM.

Aktuální rychlost počítáme z rozdílu aktuální polohy a polohy z minulého přerušení dělené periodou časovače. Právě dělení číslem výrazně menším než nula způsobuje potíže zejména v nízkých rychlostech, protože rozdíl poloh je také malý.

Vzhledem k setrvačnosti „rotoru“ není možná skoková či příliš rychlá změna polohy. Proto byl zaveden filtr eliminující nadměrné změny rychlosti. Každá hodnota vypočtená v přerušení je porovnána s minulou hodnotou rychlosti a pokud je rozdíl příliš velký, jedná se očividně o chybnou hodnotu, pro regulaci ji neuvažujeme a vycházíme z předchozí hodnoty rychlosti. Další opakování výpočtu provádíme v následném přerušení.

Vzhledem k poruchám a šumu na analogovém odměřování polohy bylo nutné prodloužit časový interval, to znamená, že rychlost počítáme každé desáté přerušení.



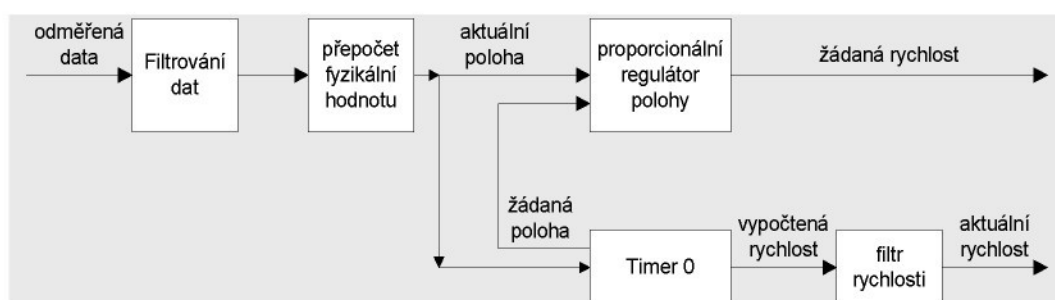
Obr. 8.13 - Blokové schéma regulace rychlosti

Záměrně jsme neupravili interval Timeru0, protože v tomto přerušení vypočítáváme ještě žádanou polohu a vysíláme data o stavu pohonu. Díky krátkému intervalu Timeru0 dostáváme hladší stupňovitou pilu žádané polohy.

8.2.4 Realizace polohové zpětné vazby

Polohová zpětná vazba je realizována pomocí proporcionálního regulátoru polohy a odměření polohy a žádané polohy. Odměřování polohy je prováděno magnetostrikčním senzorem^[28]. V jeho analogovém výstupu je patrná složka spínání ultrazvukové vlny, proto je odměřování polohy prováděno při každém PWM_SYNC interruptu. A opět je využito klouzavého průměrování.

Po klouzavém průměrování je celočíselná hodnota přepočtena na fyzikální rozměr v milimetrech pomocí převodní rovnice.



Obr. 8.14 - Blokové schéma odměřování a regulace polohy, příprava pro regulaci rychlosti

Žádaná hodnota polohy by mohla být zadána pomocí analogového vstupu, ale nyní je generována v přerušení Timeru0 Obr. 8.14.

Dalším problémem odměřování pomocí magnetostrikčního senzoru je magnetické pole produkované rotorovou cívkou procházenou proudem. Tento problém je o to významnější, že magnetické pole je proměnné v závislosti na velikosti regulačního zásahu a tak jsou vlastně generovány náhodné hodnoty polohy. Proto je magnetostrikční senzor využitelný jen pro stanovení výchozí polohy po zapnutí systému a parkování do výchozí polohy.

Všechny nedostatky spojené s odměřováním polohy a regulací rychlosti by měl odstranit lineární inkrementální enkodér, který díky optickému principu odečítání nebude rušen.

8.2.5 Komunikace DSP s okolím

Pro komunikaci s okolím můžeme využít několik možností. V první řadě to jsou číslicové vstupy výstupy označované jako Flags. Ty máme možnost nakonfigurovat jako vstupní, výstupní, reagující na hladinu, hranu či obě hrany.

My jsme využili PF0, jako „Enable“. Při vynutí běhu programu z počítače, je zastaven sice běh programu, ale hodnoty v PWM_Duty registr jsou zachovány, to znamená, že je zachována poslední hodnota proudu. My ovšem potřebujeme v první řadě při vynutí programu nastavit střidu na 50%, aby nedošlo k samovolnému posunu. Pro vynutí pohonu v podstatě necháváme pracovat regulační algoritmy, ale „odpínáme“ PWM modul. Při opětovném zapnutí je regulace v saturaci, což má za následek rychlé najetí do požadované polohy.

Další možností komunikace s procesorem je využití analogového signálu. Typickou možností využití je předávání žádané hodnoty polohy.

Číslicově analogový převodník umístěný na desce EZ-kitu můžeme využít pro předání dat okolí pomocí analogových výstupů. Tyto výstupy můžeme využít pro předávání například okamžité hodnoty proudu.

Poslední možností je využití CAN kontroléru. Ke CANu lze přistupovat pomocí šestnácti „mailboxů“ konfigurovatelných vstupně nebo výstupně. Každý mailbox má čtyři šestnáctibitové registry, kam lze ukládat data.

Pomocí CANu bude možné provést nahrání nových dat polohy či parametrů regulátorů z nadřazeného softwaru.

8.2.6 Obsluha systémových funkcí

Obsluhou systémových funkcí myslíme zejména obsluhu přerušení, které využíváme k sekvencování programu.

Před vlastním využitím je ovšem přerušení nutné povolit a přiřadit mu požadovanou prioritu.

Základní nastavení se provádějí v ICNTL registru, kde jsou například bity pro globální povolení přerušení či pro povolení vnořených přerušení.

Procesor může využít až šestnáct priorit přerušení, přičemž každému přerušení odpovídá bit v IMASK registru. Spodní čtyři bity jsou systémová přerušení procesoru s nejvyšší prioritou, které nemůžeme zakázat. Bit patnáct odpovídá USR11, tedy jedenáctému využitelnému přerušení, které má nejnižší prioritu.

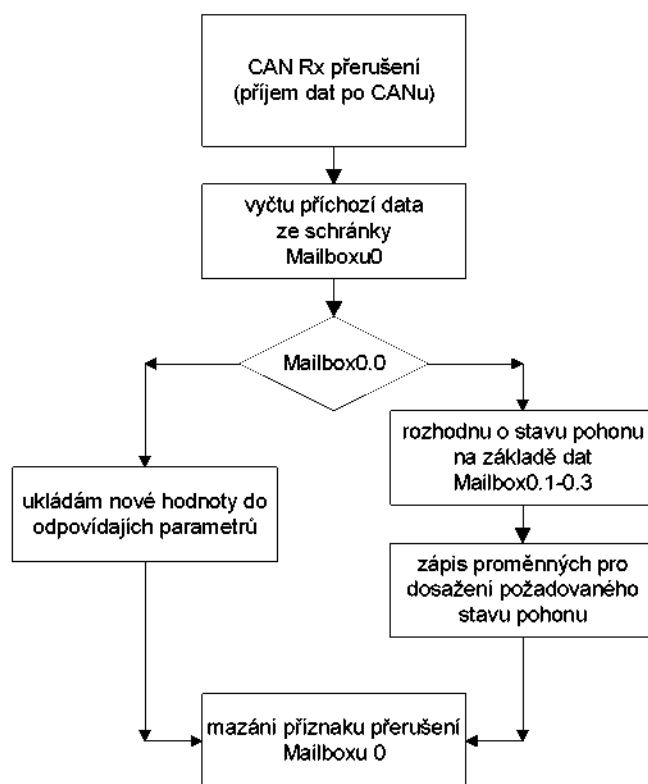
Zdrojů přerušení je ovšem osmnáct, přičemž každý zdroj má přidělené čtyři bity v příslušném IPRx registru. Zápisem čísla od nuly do jedenácti včetně přidělujeme příslušnému zdroji přerušení prioritu. Celá logika číslování je zde posunuta právě o čtyři systémové zdroje přerušení. Zapišeme – li například deset využíváme přerušení USR_10, což odpovídá bitu v IRPTL registru. V masce tedy musíme také povolit bit čtrnáct.

Další komplikací je přidělení fyzického signálu zdroji přerušení. Tento registr není posunutý o čtyři systémová přerušení, tedy SIG4 odpovídá USR0.

Celá situace se dále komplikuje tím, že můžeme dvěma různým fyzickým zdrojům přerušení přidělit stejnou prioritu. V obslužné rutině se pak na základě předávaného parametru rozhoduje o vykonání odpovídajícího kódu.

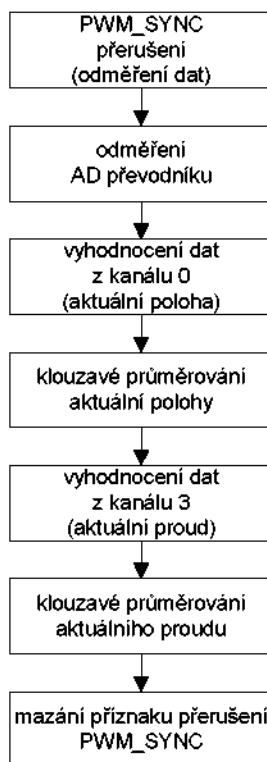
Pokud využíváte latchovaných zdrojů přerušení, je nutné na konci obslužné rutiny vymazat příslušný bit v IRPTL registru, popřípadě FLAG přerušení, jinak je

přerušení vyvoláváno znovu a znovu. Pro sekvencování programu využíváme tři zdrojů přerušení, každé s jinou prioritou.



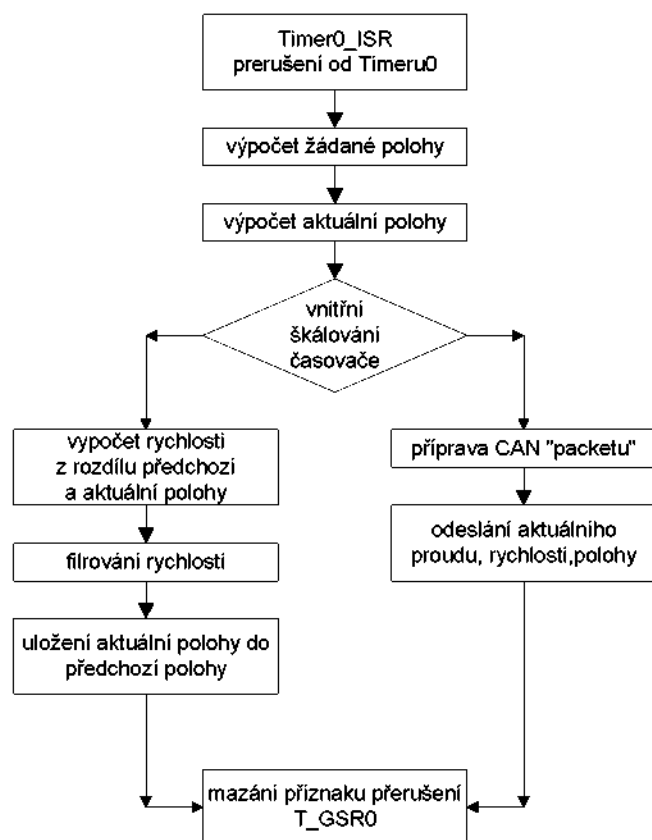
Obr. 8.15 – Obslužná rutina přerušení přijímače CANu

Vzhledem k tomu, že využíváme *CAN* k ovládání pohonu, start a zastavení, požadujeme vysokou prioritu v plánování přerušení pro řídicí systém. V principu tedy využíváme *CAN* podle schématu Obr. 8.15. Po příchodu dat rozhodneme podle prvních šestnácti bitů, tedy *mailboxu0.0*, o povaze zbývajících dat. Hodnotu parametru v *mailboxu0.0* můžeme prezentovat jako „identifikátor“, podle které se rozhoduje, které parametry budou aktualizovány. Obsah zbývajících mailboxů tvoří přenášená data, tedy hodnoty parametrů. V rutině je využito vlastně pouze rozhodovací smyčky *CASE* pro vyhodnocení adresy a přiřazení, nebo několik jednoduchých *IF*ů pro rozhodnutí o žádaném stavu pohonu.



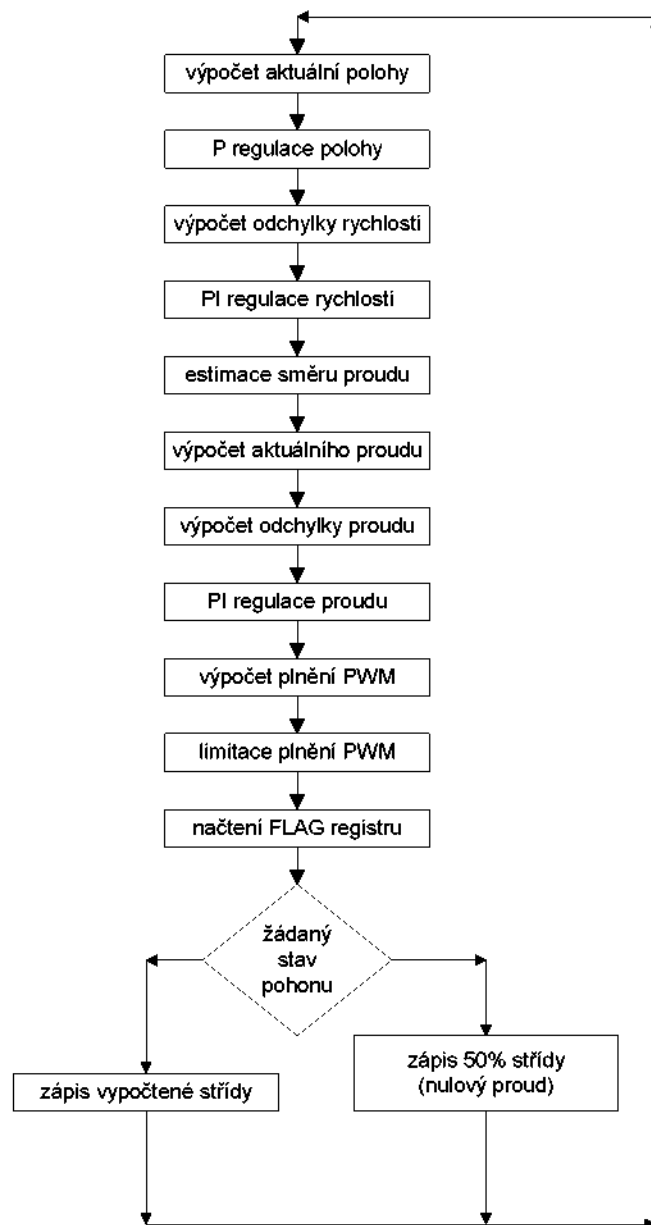
Obr. 8.16 – Obslužná rutina přerušení PWM_SYNC

Přerušení, jehož zdrojem je PWM kontrolér, má nízkou prioritu, protože je spouštěn modulační frekvencí PWM. V obslužné rutině jsou odměřena a zpracována data Obr. 8.16. Všechny operace probíhají v celých číslech. Přepočet do fyzikálních rozměrů a plovoucí čárky je zpracován až v těle hlavního programu Obr. 8.18.



Obr. 8.17 - Obslužná rutina přerušení Timeru 0

Obslužná rutina přerušení, jehož zdrojem je *Timer0*, je poměrně komplikovaná. Pokud bychom vykonávali všechny operace, byla by obslužná rutina velmi dlouhá. Proto je časovač škálován ještě vnitřním čítačem Obr. 8.17. Výpočet žádané polohy je proveden v každém přerušení, aby průběh žádané funkce byl co nejspojitější. Rovněž je přepočítávána celočíselná hodnota polohy na hodnotu v plovoucí čárce a fyzikálním rozměru. Na základě hodnoty časovače je pak proveden buď výpočet rychlosti nebo odeslání dat proudu, rychlosti a polohy pomocí CANu.



Obr. 8.18 - Blokové schéma cyklu hlavní smyčky

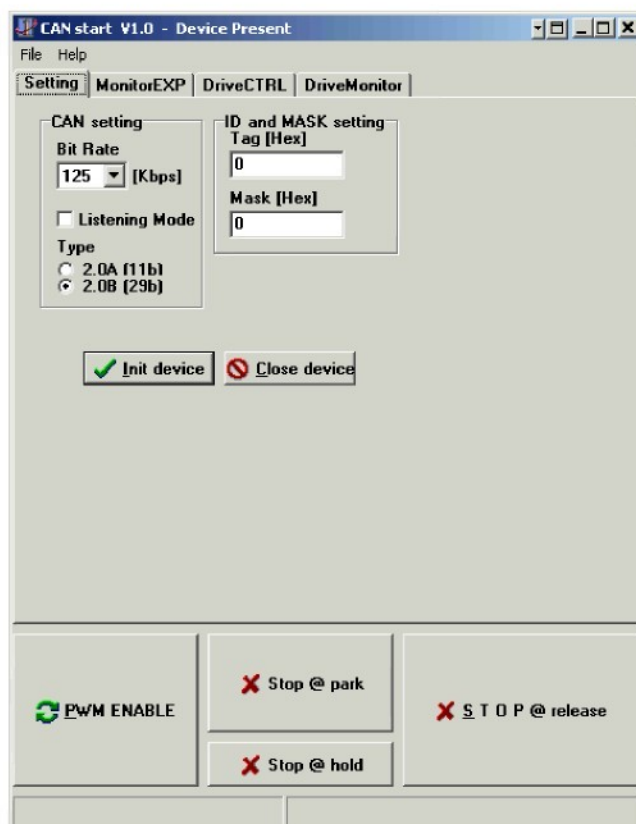
V hlavním programu po vykonání inicializační části programu probíhá nekonečný cyklus hlavní smyčky Obr. 8.18, do kterého zasahují jednotlivá přerušení. V hlavní smyčce jsou prováděny regulační výpočty, odměřování potom probíhá v přerušení. Celý blok je zakončen limitací hodnoty plnění, aby nedošlo k vyvolání hardwarové nadproudové ochrany a vlastní nastavení požadované střidy v normálním stavu, či nastavení nulového proudu v případě požadovaného uvolnění rotoru.

8.3 Vývoj softwaru pro nadřazený řídicí systém

Jako nadřazený řídicí systém jsme vybrali osobní počítač se systémem Windows XP. Všechny důležité regulační a měřicí procesy zpracovává DSP, nadřazený řídicí systém slouží hlavně k parametrizaci pohonu. Obecně lze ovšem využít jakýkoli systém s CAN rozhraním.

Prioritou softwaru osobního počítače je komunikace s DSP pomocí CANu. Protože CAN není standardní počítačovou periferií, využíváme pro komunikaci komerčně prodáváný převodník USB_CAN založený na bázi FTDI chipu.

Pomocí obousměrné komunikace se vyměňují data o aktuálním stavu pohonu a spouští, zatavuje a konfiguruje pohon. Vzhledem k faktu, že umožňujeme zapisovat jak parametry regulátorů tak běžné polohovací údaje, musíme prostředí rozdělit na základní a expertní mód.



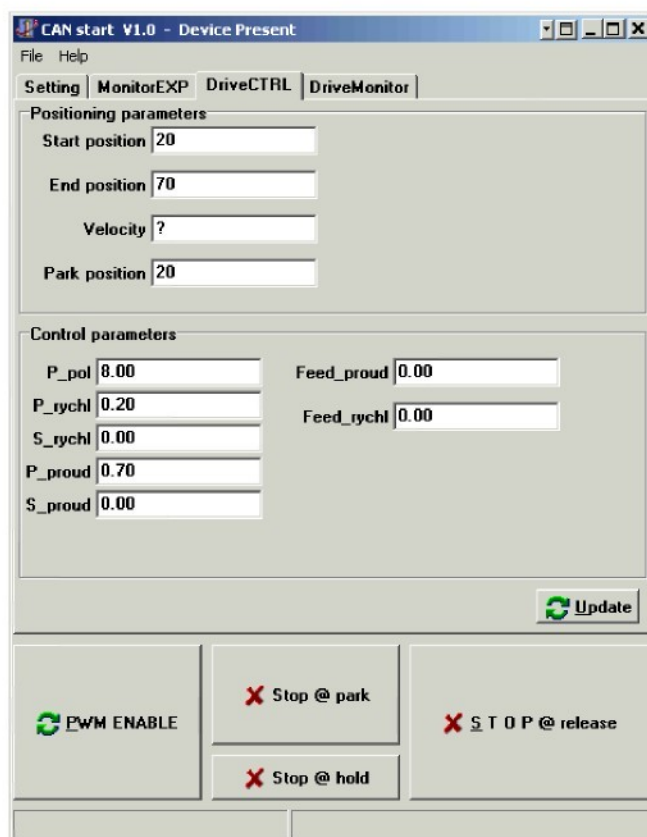
Obr. 8.19 – Nastavení komunikačních parametrů

Celá aplikace je členěna pomocí záložek Obr. 8.19. Základní ovládací tlačítka jsou přístupná ze všech záložek. PWM_enable zapíná pohon, respektive umožňuje buzení výkonového můstku. Tlačítko Stop/park vypíná pohon a parkuje ho do definované polohy, tlačítko Stop/hold zastavuje pohon v aktuální poloze, zatímco Stop/release vypíná pohon zakázáním buzení tranzistorů. Rotor je tedy volně pohyblivý.

V záložce Setting Obr. 8.20 se nastavují parametry komunikace a identifikátor zařízení, který má význam priority na sběrnici, a dále maska k filtrování příchozích dat.

Záložka monitorEXP , kterou je možné využít pouze v expertním módu, umožňuje zobrazení dat sběrnice, typ a počet jednotlivých poruch komunikace a také ručně odeslat data.

Záložka DriveCTRL je dělena do dvou základních oblastí.



CAN start V1.0 - Device Present

File Help

Setting | MonitorEXP | DriveCTRL | DriveMonitor

Positioning parameters

Start position 20

End position 70

Velocity ?

Park position 20

Control parameters

P_pol 8.00 Feed_proud 0.00

P_rychl 0.20 Feed_rychl 0.00

S_rychl 0.00

P_proud 0.70

S_proud 0.00

Update

PWM ENABLE

Stop @ park

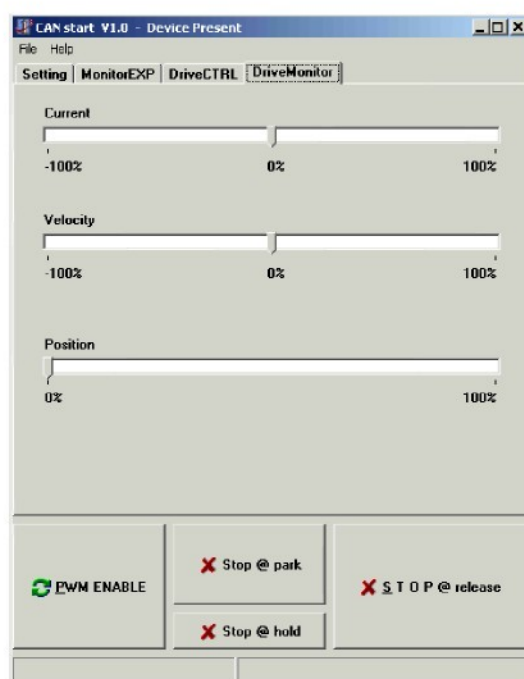
Stop @ hold

STOP @ release

Obr. 8.20 - Zadávání parametrů pro řízení pohonu

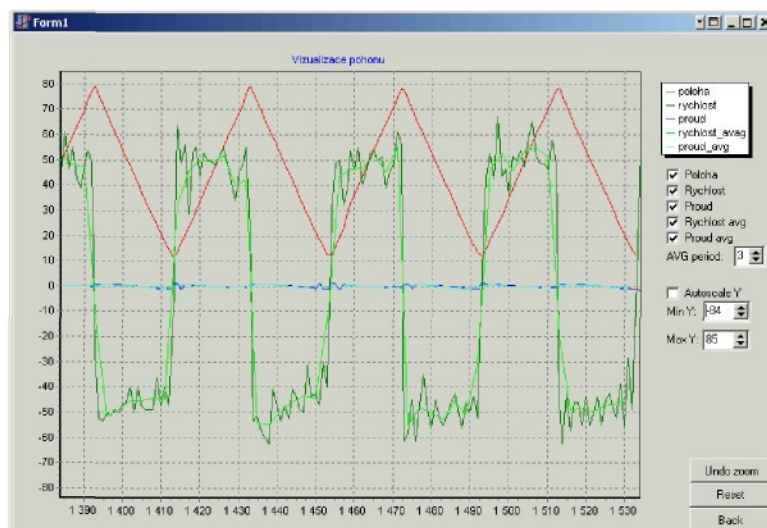
Oblast Positioning parameters je přístupná v běžném módu a slouží k zadání základních parametrů pro pohyb motoru, krajních poloh, parkovací polohy apod. Control parameters je přístupná pouze v expertním módu a slouží k nastavení parametrů regulátorů Obr. 8.20.

Poslední záložka je DriveMonitor Obr. 8.21, která slouží k vizualizaci aktuální polohy, rychlosti a zrychlení.



Obr. 8.21 - Vizualizace aktuálního stavu pohonu

Časový průběh jednotlivých veličin lze zobrazit na grafu Obr. 8.22, kde lze provést také další nastavení zobrazení.



Obr. 8.22 – Vizualizace polohování

Jednotlivé průběhy polohy, rychlosti či proudu se dají odstranit z grafu, aby bylo možné pozorovat pouze požadovaný průběh. Dále lze také upravit průměrování průběhu rychlosti a proudu a nastavit měřítko vertikální osy.

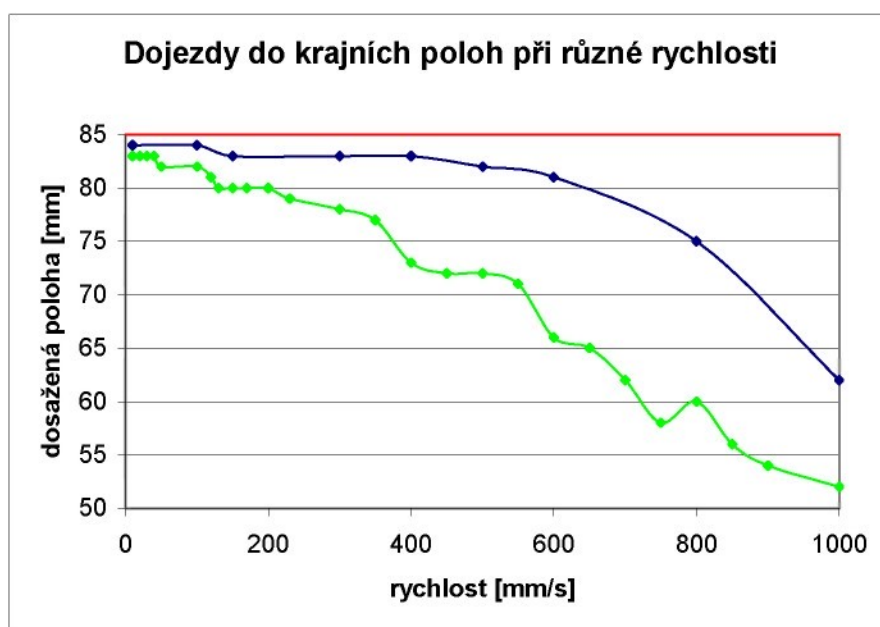
Tažením myši lze v grafu zoomovat a pomocí levého tlačítka posunovat jak ve vertikálním tak i horizontálním směru.

9 Výsledky funkčních zkoušek

Motor má poměrně dobrou dynamiku, ta je zajištěna dobrou regulací proudového regulátoru. Z hlediska vstupu žádané polohy je ale chování horší. Kvůli nevhodnému systému odměřování polohy není možné nastavit přiměřené zesílení rychlostního regulátoru, proto motor při vysokých požadovaných rychlostech nedojíždí do krajních poloh. Situaci demonstrujeme pro dvojí nastavení regulátorů. Jedna z úvratí byla nastavena na 85mm. Testovali jsme absolutní odchylku dojezdů do krajní polohy při různých žádaných rychlostech pro dvojí nastavení regulátorů Tab. 9.1.

kpol	kv	ki	průběh
5	0,06	0,4	zelený
7	0,11	0,5	modrý
14	0,2	0,8	nestabilní

Tab. 9.1 – Nastavení regulátorů pro testování



Graf 9.1 - Dojezdy do krajní polohy pro různé nastavení podle Tab. 9.1

V grafu, Graf 9.1, jsou zobrazeny tři průběhy. Rudý je ideální průběh kterého nelze v praxi dosáhnout. Zelený průběh odpovídá neagresivnímu nastavení

regulátorů a je zde dobře patrná nepřesnost v dojezdu polohy na rychlosti 600mm/s. Oproti tomu modrý průběh zobrazuje korektní dojezdy až do rychlosti 600mm/s a pak následuje útlum. Z grafu je patrná závislost kvality regulace na nastavení regulátorů.

Pro další zkvalitnění regulace bylo zejména nutné zlepšit odměřování polohy, neboť rychlost počítáme numericky derivací. Vzhledem k vysokým hodnotám spínaného proudu byla informace z magnetostrikčního čidla s analogovým výstupem zarušena, což způsobovalo problémy při numerické derivaci. Po náhradě IRC čidlem s 200 pulzy/mm byl tento problém odstraněn.

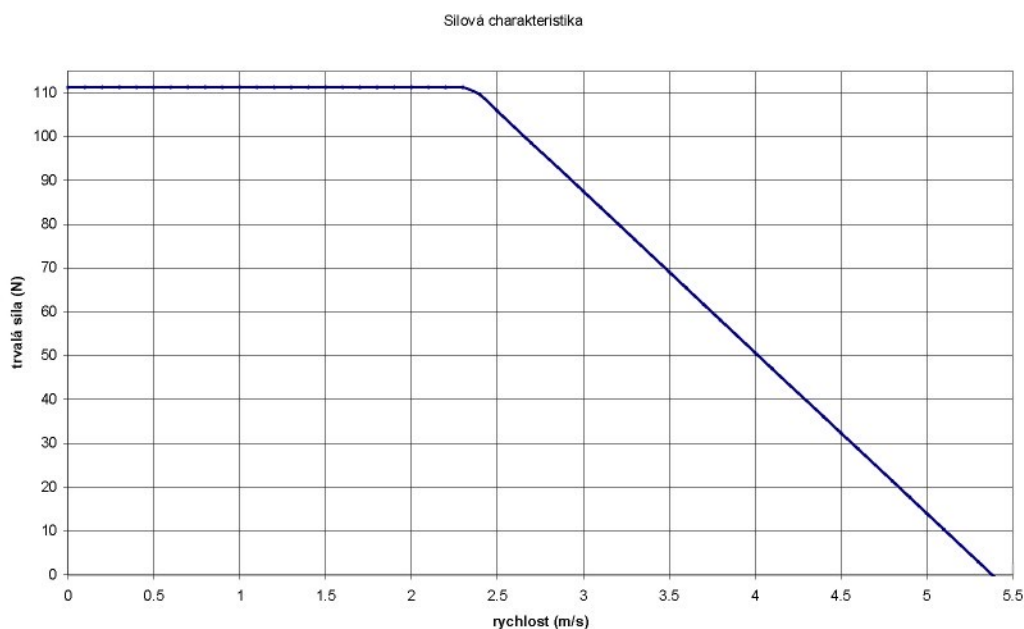
Dalším zlepšením byla změna odměřování proudu pomocí LEM LTS 25. Jedná se v podstatě o měřicí transformátor s analogovým výstupem. Modul řízení proudu se nám tím rozložil do dvou zcela nezávislých částí, proudového omezení v obvodu budiče FETů a odměřování proudu LEM. Tato náhrada nám umožňuje získat směr průchodu proudu přímo z měření, odpadá tedy nutnost estimace v signálovém procesoru.

Pohon v současném uspořádání má tyto parametry:

Špičková síla @ 0.02s	111.25	[N]
Trvalá síla	53.4	[N]
Špičkový proud @ 0.02s	25	[A]
Trvalý proud	12	[A]
Max. napájecí napětí	36	[V]
Typ. napájecí napětí	24	[V]
Silová konstanta	4.45	[N/A]
Elektrická konstanta	4.46	[V/m/s]
Odpor vinutí @ 21 °C	0.4	[Ohm]
Odpor vinutí @ 100 °C	0.54	[Ohm]
Indukčnost vinutí @ 1kHz	27	[mH]
Max. teplota vinutí	115	[°C]
Max. teplota rotoru	125	[°C]
Max. zrychlení	371	[]
Max. teoretická rychlost	5.38	[]
Maximální zdvih	120	[mm]
Hmotnost pohyblivých částí	300	[g]

Tab. 9.2 – Parametry elektrodynamického pohonu s cívkou 2

Vzhledem k nemožnosti změřit silovou charakteristiku na reálném zařízení, provedli jsme výpočet na matematickém modelu při respektování proudových a napěťových omezení reálného pohonu.



Graf 9.2 – Silová charakteristika elektrodynamického pohonu

Část průběhu s konstantní silou je definována zejména silovou konstantou motoru a dovolenou hodnotou trvalého proudu. Ta je omezena maximálním ztrátovým výkonem cívky, jejím dovoleným oteplením, volbou spínacích součástek, proudovým odměřováním a proudovým omezením. Umístění kolena charakteristiky a sklon jejího útlumu závisí na elektrické konstantě pohonu a velikosti napájecího napětí. S rostoucím napětím se koleno posouvá k vyšším rychlostem, ale zároveň klesá přesnost řízení PWM.

10 Závěr

Disertační práce se zabývá možnostmi uplatnění elektrodynamického pohonu jako jednoduchého lineárního motoru malého výkonu. Přínosem jsou zejména matematické modely, které se dají využít při dimenzování reálného pohonu. Práce obsahuje i praktický výstup v podobě prototypu elektrodynamického pohonu řízeného v uzavřené regulační smyčce pomocí signálového procesoru.

V teoretické části byl vypracován matematický model rozváděcí tyče dopřádacího stroje, který lze použít pro dimenzování, simulaci provozního stavu a nastavení regulačních algoritmů libovolného pohonu v této aplikaci.

Disertační práce rovněž obsahuje praktické ověření funkčního principu i matematický model elektrodynamického pohonu. Dále byly prozkoumány možnosti řízení v otevřené i uzavřené regulační smyčce. Při konstrukci funkčních modelů byly využity různé principy měřících systémů polohy. Rovněž byly ověřeny možnosti řízení elektrodynamického pohonu v otevřené regulační smyčce za použití jednoduchého mikrokontroléru.

Elektrodynamický systém má zásadní výhodu v jednoduchosti jeho konstrukce a konstantním momentu po celé dráze. Díky jediné napájené cívce je i jednoduchá regulační struktura obsahující pouze jediný proudový regulátor. Konstrukční uspořádání elektrodynamického motoru s jedinou cívkou má ovšem zásadní nevýhodu. Činná část cívky, tvořící sílu motoru, je ta mezi pólovými nástavci. Zbývající část tvoří pouze parazitní indukčnost a odpor. Proto se elektrodynamický systém nedá využít pro zajištění dlouhého zdvihu či vysokých dynamických nároků.

Tyto nedostatky odstraňují lineární synchronní elektromotory v pístnicovém provedení. Mají jednoduchou konstrukci, oproti klasicky uspořádaným lineárním pohonům nulovou přitažlivou sílu mezi primární a sekundární částí. V posledních letech, díky pokroku v materiálovém inženýrství a výrobních technologiích pro výrobu permanentních magnetů, jsme schopni relativně malým proudem docílit

velké síly. Tím dochází ke snížení ztrátového výkonu na vinutí a odpadají problémy s chlazením, které se vyskytovaly u předchozí generace lineárních pohonů. Proto bych při řešení dynamicky náročných aplikací v textilním průmyslu volil synchronní pístnicové servopohony.

Disertační práce ukazuje možnosti jednoduché mechanické koncepce elektrodynamického pohonu, která je podporována moderním způsobem řízení výkonu a výkonným řídicím systémem založeném na digitálním signálovém procesoru a uživatelským softwarem v nadřazeném řídicím systému.

Seznam nejpoužívanějších symbolů

a	<i>zrychlení</i>
AD, ADC	<i>analogově číslicový převodník</i>
B	<i>magnetická indukce</i>
b	<i>váha váženého průměru</i>
β	<i>úhel</i>
$BT\ 903\ FXL$	<i>typ doprřadacího stroje firmy Rieter</i>
c	<i>tepelná kapacita</i>
c	<i>tuhost pružiny</i>
CAN	<i>Conroler area network</i>
CNC	<i>Computer numeric control</i>
D	<i>koeficient tlumení</i>
δ	<i>poměrné tlumení</i>
Δp	<i>ztrátový tlak v motoru</i>
dF	<i>přírůstek síly</i>
dl	<i>element délky cívky</i>
ds	<i>element dráhy/délky</i>
dx	<i>element polohy</i>
$e(k)$	<i>regulační odchylka diskrétní</i>
$e(t)$	<i>regulační odchylka spojitá</i>
ew	<i>vážená regulační odchylka</i>
F	<i>síla</i>
$f(x)$	<i>obecná funkce proměnné x</i>
F_c	<i>síla trvalá</i>
FET	<i>Field effect tranzistor</i>
F_m	<i>síla elektrodynamického motoru</i>
F_n	<i>jmenovitá síla</i>
F_p	<i>špičková síla</i>
F_z	<i>zátěžná síla</i>
$g(f(t))$	<i>obecná složená funkce proměnné t</i>
h	<i>označení vzdálenosti</i>
h	<i>tloušťka desky</i>
I	<i>proud</i>
I_m	<i>maximální proud</i>
I_n	<i>nominální proud</i>
$\vec{j}$	<i>normálový vektor proudu</i>
k	<i>koeficient tlumení</i>
k	<i>index vzorku</i>

K_f	<i>silová konstanta</i>
K_i	<i>proporcionální zesílení regulátoru proudu</i>
K_p	<i>proporcionální zesílení obecně</i>
K_{pol}	<i>proporcionální zesílení regulátoru polohy</i>
K_v	<i>proporcionální zesílení regulátoru rychlosti</i>
l	<i>zdvih, délka obecně</i>
L	<i>indukčnost</i>
l	<i>délka cívky</i>
l	<i>délka vodiče</i>
λ	<i>tepelná vodivost</i>
l_m	<i>délka motoru</i>
l_p	<i>délka zdvihu lineárního motoru</i>
l_s	<i>délka dráhy lineárního motoru</i>
m	<i>hmotnost</i>
μ_0	<i>permeabilita vakua</i>
μ_r	<i>relativní permeabilita</i>
MOSFET	<i>metal-oxid semiconductor field effect tranzistor</i>
m_p	<i>hmotnost primární části</i>
m_s	<i>hmotnost sekundární části</i>
PLL	<i>phase locked loop</i>
P_{vn}	<i>nominální ztrátový výkon</i>
PWM	<i>pulzně šířková modulace</i>
PWM_DT	<i>pulzně šířková modulace_death time</i>
PWM_DUTY	<i>pulzně šířková modulace_plnění</i>
PWM_TM	<i>pulzně šířková modulace_perioda</i>
P_z	<i>ztrátový výkon</i>
Q	<i>teplo</i>
q	<i>teplo</i>
R	<i>odpor vinutí, odpor obecně</i>
R_{dson}	<i>odpor tranzistoru v sepnutém stavu</i>
R_{ha}	<i>tepelný odpor rozhraní chladič okolí</i>
R_{ch}	<i>tepelný odpor rozhraní pouzdro chladič</i>
R_{ja}	<i>celkový tepelný odpor polovodič okolí</i>
R_{jc}	<i>tepelný odpor rozhraní polovodič pouzdro</i>
ρ	<i>hustota</i>
ρ	<i>měrný elektrický odpor</i>
t	<i>čas</i>
T	<i>perioda, doba cyklu</i>
t	<i>tloušťka vodiče</i>
T_0	<i>perioda algoritmu</i>

T_a	<i>teplota okolí</i>
t_{abs}	<i>absolutní teplota vinuti</i>
t_c	<i>doba trvání trvalé síly</i>
t_{c0}	<i>teplota chladiwa vstupní</i>
T_d	<i>derivační konstanta</i>
v_m	<i>oteplení vinuti skutečné</i>
T_i	<i>integrační konstanta</i>
T_j	<i>teplota polodičového chipu</i>
t_p	<i>doba špičky</i>
t_{wgm}	<i>maximální oteplení vinuti</i>
UART	<i>univerzální asynchronní přijímač-vysílač</i>
v	<i>rychlost obecně</i>
V_{dss}	<i>napětí drain source tranzistoru</i>
v_n	<i>navíjecí rychlost</i>
v_p	<i>přídavná rychlost</i>
v_r	<i>rozváděcí rychlost</i>
w	<i>žádaná veličina</i>
w	<i>šířka</i>
x	<i>označení vzdálenosti, souřadnice obecně</i>
$\dot{x}$	<i>rychlost</i>
$\ddot{x}$	<i>zrychlení</i>
y	<i>výstupní veličina</i>

Seznam informačních zdrojů

- [1] SLOUPENSKÝ, Jiří, KUBEŠ, Vítězslav. Způsob rozvádění příze při navíjení příze na cívku a zařízení k rozvádění příze: PV2002-3430,PS3352CZ. Ústí nad Orlicí: Rieter CZ a.s., 2002.
- [2] SOUČEK, Pavel. *Servomechanismy ve výrobních strojích*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02902-6
- [3] JAVŮREK, Jiří. *Regulace moderních elektrických pohonů*. Praha: Grada publishing a.s., 2003. ISBN 80-247-0507-9
- [4] KVASNICA, Jozef. *Mechanika*. Praha: Academia – nakladatelství České akademie věd, 2004. ISBN 80-200-1268-0
- [5] LONGORIA, Raul.G.. *Experimental Determination of Parameters for a Linear Second Order System*. Austin: The university of Texas, Department of Mechanical Engineering, 2000
- [6] VOREL, Pavel. *Výkonové elektromechanické systémy v silničních vozidlech*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2005.
- [7] FOUNĚ, František. *Rozvádění příze vačkou při navíjení na bezvřetenovém doprácím stroji: Výpočtová zpráva*. Liberec: VUTS Liberec a. s., 2003
- [8] ČERNOHORSKÝ, Josef. STŘEŠTÍK, Petr. *Možnosti zlepšení rozvádění na stroji řady BT*. Liberec: VUTS Liberec a.s., 2003
- [9] PÁVEK, Miroslav. *Československé textilní strojírenství*. Praha: Nakladatelství dopravy a spojů, 1981.
- [10] HLAVA, Jaroslav. *Prostředky automatického řízení II*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02221-8

- [11] KLÁN, Petr. Metody zlepšení PI regulace. *Automa*, 2001, číslo 12, ISSN 1210-9592
- [12] HEROUT, Pavel. *Učebnice jazyka C*. České Budějovice: Kopp nakladatelství, 2001. ISBN 80-85828-21-9
- [13] BENDA, Vítězslav. *Výkonové polovodičové součástky a integrované struktury*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1993. ISBN 80-01-01140-2
- [14] POMPE, František. *Teorie soukání*. Praha: Nakladatelství České akademie věd, 1958.
- [15] Synchronous Linear Motor LSF: Project Planning Manual, Selection Data and Commissioning. Lohr a. Main: Rexroth Indramath GmbH, 2000.
- [16] *Součástky pro elektrotechniku*. Praha: GM electronic s.r.o., 2004.
- [17] DRAXLAR, Karel. *Magnetické prvky*. Praha: Ediční středisko ČVUT, 1984.
- [18] *Měření na stroji BT 903 FXL*. Liberec: Výzkumný ústav textilních strojů, 2003.
- [19] *ADSP-2199x Mixed Signal DSP Controler: Hardware reference*. Massachusetts: Analog device, Inc., Digital Signal Procesor division, 2003.
- [20] *ADSP-21990: Generation of Tree-phase Sine-wave PWM patterns*. Massachusetts: Analog device, Inc., Digital Signal Procesor division, 2001. AN21990-03
- [21] *ADSP-21990: Imlementation of PI Controllers*. Massachusetts: Analog device, Inc., Digital Signal Procesor division, 2001. AN21990-13

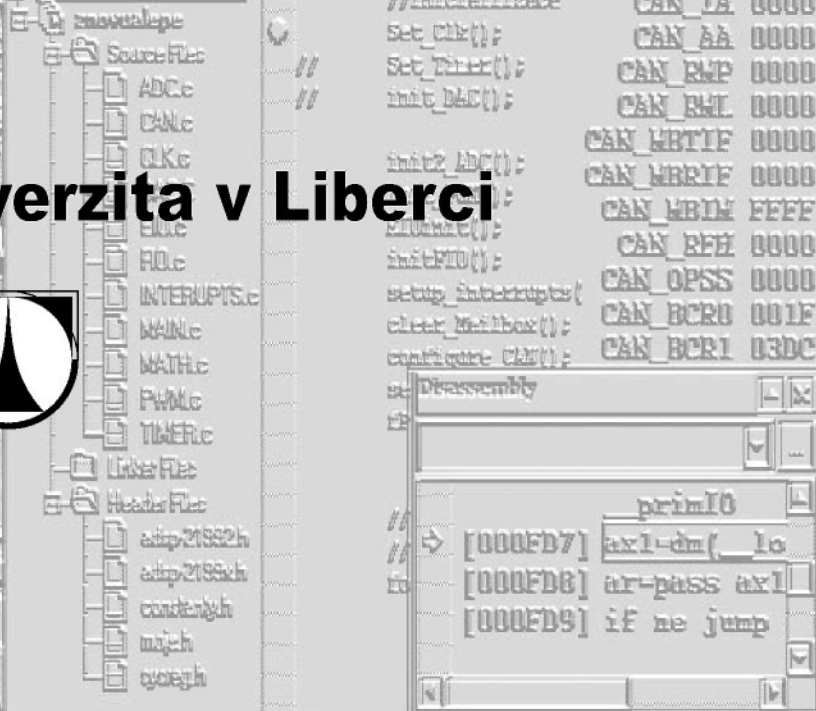
- [22] *ADSP-21990: Utilization of the Analog to Digital Converter (ADC).* Massachusetts: Analog device, Inc., Digital Signal Procesor division, 2002. AN21990-05
- [23] *ADSP-21990: Reference Frame Conversions.* Massachusetts: Analog device, Inc., Digital Signal Procesor division, 2002. AN21990-11
- [24] *ADSP-21992 Ez-Kit Lite: Evaluation System Manual.* Massachusetts: Analog device, Inc., Digital Signal Procesor division, 2003.
- [25] *CAN Configuration Procedure for ADSP-21992 DSPs.* Massachusetts: Analog device, Inc., Digital Signal Procesor division, 2004
- [26] BT 905: Reliable, economical alternative in rotor spinning. Ústí nad Orlicí: Rieter Elitex a.s.,2003
- [27] *Sealed Linear Encoders.* Traunreut: Dr. Johanes Heidenhain GmbH, 2003
- [28] *Temposonics:Magnetostrictive Position sensors.* Cary: MTS Sensor Corporation Sensor Division, 2005
- [29] *IR2130/IR2192(J)(S) & (PbF), Rev P.* El Segundo: International Rectifier, 2004
- [30] CATT, Jamie. *Design Tip DT 92-6: Current sensing with the IR2130.* El Segundo: International Rectifier, 2004
- [31] CATT, Jamie. *Design Tip DT 94-11: 3-Phase bridge drive with overcurrent protection.* El Segundo: International Rectifier, 2004. US 2004/0238678
- [32] HV Floating MOS-Gate driver ICs: Application note AN978-b. El Segundo: International Rectifier, 2004

- [33] *IRFZ44: Datasheet PD-9.510C*. El Segundo: International Rectifier, 2004

- [34] FRANZOLINI, Luciano: Device and apparatus with magnetic thread: Guide for winding a thread onto cylindrical supports. United States: Patent application publication, 2004

- [35] BARON, Alée Charles: Reciprocating mechanism for winding thread: WO 03/002443 A1. Valence Cedex: Rieter ICBT, 2003

Technická univerzita v Liberci



**Možnosti uplatnění
elektrodynamického
pohonu rozvádění
na doprâdacích strojích
autoreferát disertační práce**

Josef Černohorský

2006



**Možnosti uplatnění elektrodynamického pohonu rozvádění
na doprředacích strojích**

Ing. Josef Černohorský

Studijní program: P 2612 Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: 2612V045 Technická kybernetika

Pracoviště: Katedra elektrotechniky
Fakulta mechatroniky a mezioborových
inženýrských studií
Technická univerzita v Liberci
Hálkova 6, 4761 17 Liberec 1

Školitelé: Prof. Ing. Aleš Richter, CSc.
Ing. Jiří Sloupenský, CSc.

Rozsah práce a příloh:

Počet stran:	121
Počet příloh:	2
Počet obrázků:	52
Počet tabulek:	9
Počet grafů:	16
Počet schémat:	4
Počet vzorců:	88

říjen 2006

Anotace

Možnosti uplatnění elektrodynamického pohonu rozvádění na doprředacích stojích

Ing. Josef Černohorský

Disertační práce se zabývá možností modernizace pohonu rozvádění na textilních strojích. Rozvádění je využíváno na celé řadě textilních stojích. Současná řešení rozvádění pomocí speciálního mechanismu poháněného rotačním pohonem přestává být vyhovující vzhledem ke stále se zvyšujícím nárokům na kvalitu návinnu příze.

Řešení pohonu rozvádění je díky jeho přímé vazbě na textilní technologie a mechaniku stroje složitým mechatronickým uzlem.

Práce analyzuje možnosti modernizace systému rozvádění z hlediska využití konvenčních pohonů a speciálních konstrukcí pro individuální rozvádění. Dále byl identifikován a modelován systém rozváděcí tyče. Dále byl popsán, vypracován a ověřen model motoru a pohonu založeném na elektrodynamickém principu. Na funkčním modelu byly ověřeny možnosti řízení v otevřené regulační smyčce pomocí jednoduchého mikrokontroléru.

Hlavním přínosem je ověření možnosti uplatnění elektrodynamického pohonu řízeného pomocí signálového procesoru v uzavřené regulační smyčce. Pohon je možné parametrovat a ovládat pomocí CAN sběrnice. Elektrodynamický pohon je použitelný nejen v textilním průmyslu, ale obecně pro realizaci lineárního pohybu s definovaným průběhem. Výsledky této práce ukazují i další praktické realizace.

Klíčová slova: elektrický pohon, elektrodynamický systém, rozvádění, signálový procesor

Annotation

Possibilities of electrodynamic drive usage on unwinding machines

Ing. Josef Černohorský

The doctoral thesis deals with possibilities of unwinding drive modernization in textile machines. Present unwinding drive system consists of a rotary drive and a special mechanism. This solution is not able to achieve higher quality of the yarn during a high winding speed.

In the first part of the thesis there is an analysis containing several types of drives, including non conventional drive types for individual winding. The thesis consists of unwinding shaft identification and of a mathematical model of unwinding shaft too. In the second part there is a mathematical model of electrodynamic drive. There were experimented open and closed loop control algorithms at the laboratory function model

The result of the thesis is a functional model of electrodynamic drive, controlled via Digital Signal Processor in closed feed back loop. The drive is configurable through CAN by drive parameters.

The electrodynamic drive is useable both in textile industry and defined position of linear motion in general.

Keywords: electrical drive, electrodynamic system, unwinding, digital signal processing

Obsah

1.	ÚVOD DO PROBLÉMU	3
1.1	VÝHODY A NEVÝHODY STÁVAJÍCÍHO ŘEŠENÍ.....	4
1.2	MATEMATICKÝ MODEL ROZVÁDĚCÍ TYČE.....	6
2	NOVÉ MOŽNOSTI ŘEŠENÍ POHONU ROZVÁDĚNÍ.....	11
2.1	MOŽNOSTI SKUPINOVÉHO ROZVÁDĚNÍ.....	11
2.2	MATEMATICKÝ MODEL ELEKTRODYNAMICKÉHO MOTORU	13
3	VÝSLEDKY FUNKČNÍCH ZKOUŠEK.....	17
4	ZÁVĚR.....	21
	VÝBĚR Z INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	22
	VLASTNÍ DÍLA Z OBLASTI APLIKOVANÉHO VÝZKUMU A PRŮMYSLVÉHO VÝVOJE	23
	PUBLIKACE	23

1. Úvod do problému

Pravidelný lineární vratný pohyb spolu s rotačním pohybem je využíván jako základ mnoha technologických procesů a výrobních operací. V závislosti na rychlosti, síle, přesnosti polohování jsou realizovány různými prostředky. Od konvenčních pneumatických válců s jednoduchým ovládáním, přes složité mechanické převodovky či vačky poháněné konvenčními rotačními pohony až po lineární synchronní servomotory s vysokou přesností využívané v *CNC* obrábění.

Speciálním odvětvím, kde jsou kladené vysoké nároky na dynamiku a rychlost, je oblast textilních strojů. Lineární pohyb je nutný například k rozvádění příze na dopřádacích strojích, soukacích strojích či skacích strojích, ale i k pohybu listů na tkacích stavech.

Dopřádací stroj je textilní stroj, který z polotovaru ve formě pramene vláken přírodního či syntetického materiálu vyrábí přízi. Pramen je skladován v konvích válcového či kvádového průřezu, vyrobená příze ve formě návinů na dutinkách. Na dopřádací stroje jsou kladeny vysoké nároky na produkci, variabilitu a minimální zástavbové rozměry. Stroje musí být schopné vyrobit návin v různých šířkách a s různým úhlem křížení.^[14] Pro vysokou produktivitu dosahují navíjecí rychlosti až 200 m/min , což znamená rychlost polohování příze vyšší než 1 m/s a prakticky skokovou změnu rychlosti v úvratí 2 m/s . Doba trvání periody pohybu dosahuje přibližně $0,3\text{ s}$.^[13]

Z důvodu nízkých zástavbových rozměrů, snadné přepravy a výrobní ceny na jedno dopřádací místo je celý stroj složený ze sekcí. V sekci je vždy několik dopřádacích míst. Vlastní dopřádací stroj se potom skládá z hlavní pohonné jednotky, sudého počtu sekcí (díky symetrii) a dalšího příslušenství. Počet sekcí určuje také celkovou délku stroje, ta činí až několik desítek metrů.

Po vlastním zpracování je příze rozváděna na dutinku pomocí rozváděcí tyče. Vzhledem k velké délce stroje musí mít tyč vysokou tuhost. Relativně nehmotná příze je polohována pomocí relativně těžké tyče. Rozváděcí tyč je rotačním pohonem se speciální převodovkou. Dalším přírůstkem pohybující hmotnosti je moment setrvačnosti převodovky a motoru. Toto mechanické uspořádání není výhodné z hlediska modifikace parametrů návinu. Dalším problémem je nestejnost parametrů návinu na různých místech rozváděcí tyče. Stávající mechanické upořádání pohonu prakticky nedovoluje zvýšit rychlost, tedy produktivitu stroje, při zachování kvality návinů.

Problematikou rozvádění se zabývá celá řada zlepšovacích návrhů a patentů. Jsou aplikovány postupy vedoucí k zvýšení tuhosti a snížení hmotnosti rozváděcí tyče. Dále jsou navrženy postupy umístění a řízení pohonů tak,^[1] aby eliminovaly parazitní vlastnosti rozváděcí tyče. Také jsou navrženy speciální pohony poměrně složité konstrukce pro rozvádění v rámci jednoho rozváděcího místa. Vzhledem k poptávce po nových dopřádacích strojích, či po repasích starších typů, je toto odvětví aplikačně zajímavé.

Řešení pohonu rozvádění je díky jeho přímé vazbě na textilní technologie a mechaniku stroje složitým mechatronickým uzlem, kde se navíc protíná jak silnoproudá elektronika tak i algoritmy založené na distribuovaném řízení.

Speciální lineární pohon s vysokou dynamikou a jednoduchou konstrukcí by měl využití nejen v textilním průmyslu, ale i v ostatních odvětvích, kde je nutné provádět lineární pohyb s definovaným časovým průběhem polohy.

1.1 Výhody a nevýhody stávajícího řešení

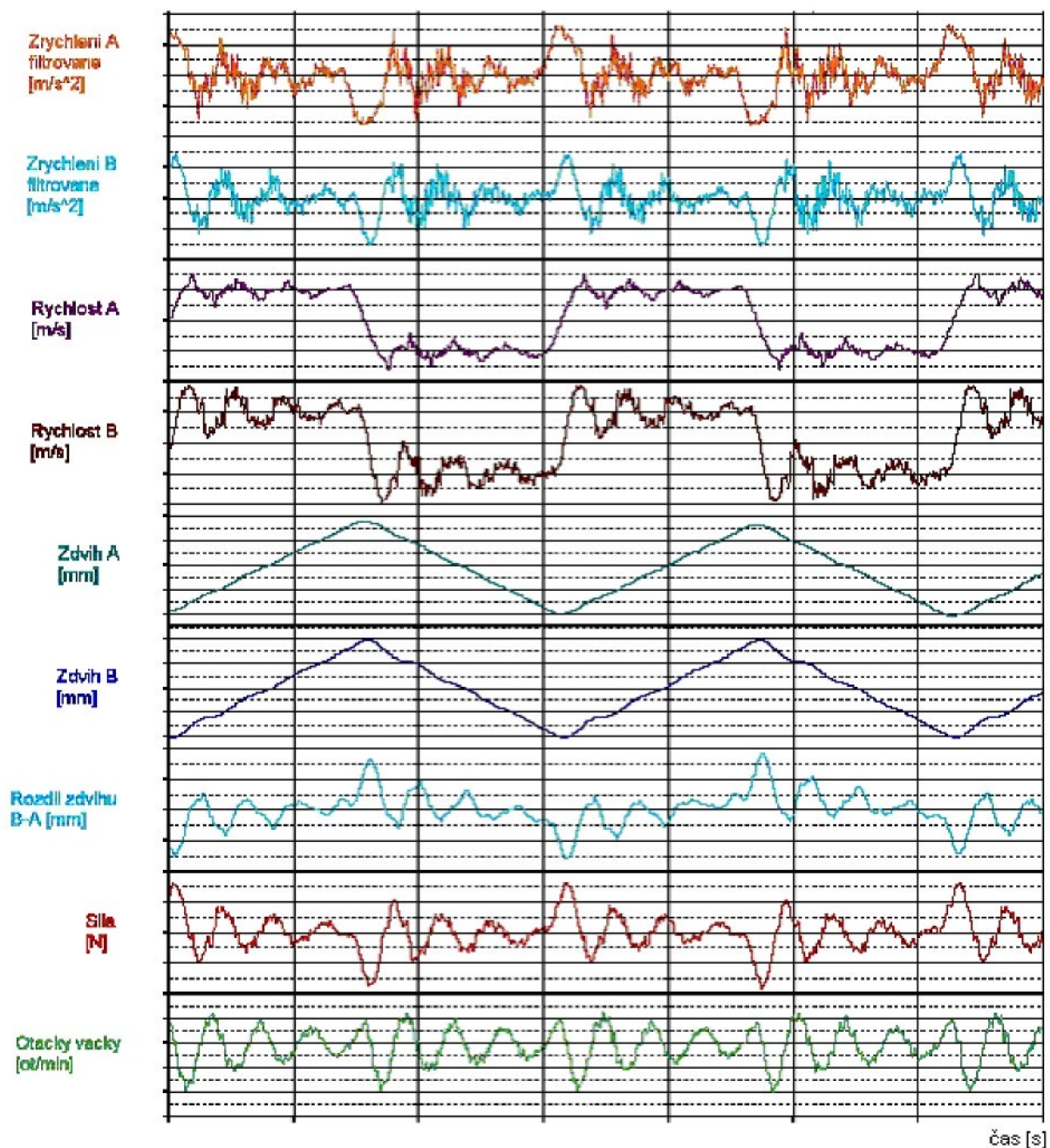
Stávající řešení tedy využívá levného pohonu, mechanického soustrojí a rozváděcí tyče a zajišťuje tak rozvádění na všech místech levé respektive pravé straně stroje.

Nevýhodou stávajícího upořádání je obtížná měnitelnost parametrů rozvádění, zejména velikost zdvihu tyče a rychlosti v jednotlivých fázích pohybu. Pro změnu velikosti zdvihu tyče je nutné upravit mechanickou vazbu mezi tyčí a elektromotorem výměnou válcové vačky. Problémem jsou nevýhodné parametry návínů v místech úvratě rozváděcí tyče.

Dalším problémem jsou vlastnosti rozváděcí tyče, především její teplotní dilatace a konečná tuhost. Vliv teplotní dilatace je kompenzován kombinací materiálů tyče v jednotlivých sekcích. Některé sekce mají tyč z hliníkové slitiny, jiné z kompozitu s uhlíkovým vláknem. Rozmístění sekcí s durallem či kompozitem se řídí počtem sekcí stroje.

Tyč se chová jako pružný element a její tuhost ovlivňuje chování na volném konci. Tím jsou způsobeny rozdíly v návínech na různých místech rozváděcí tyče, zejména pak na začátku a volném konci tyče. Tuhost souvisí také s přesností montáže, respektive s rovinností tyče. Při změně smyslu pohybu může dojít k „vylamování“ nebo k přičení tyče. Chování tyče je dobře vidět na Graf. 1 a celý problém je zjednodušeně modelován v kapitole 3.1 disertační práce.

Celý systém pohonu, mechanismu a rozváděcí tyče tvoří mechatronický uzel, jehož vlastnosti ve velké míře určují variabilitu stroje a kvalitu přízových návínů.



Graf 1 - Měření na stroji BT (měřítka záměrně nejsou uvedena)

Z grafu 1 je dobře patrné kmitání volného konce „B“ vůči hnanému konci „A“. Toto kmitání je dobře pozorovatelné v „rychlosti B“ a vyúsťuje v „rozdíl zdvihů B-A“. Výše uvedené problémy vyústily v požadavek na modernizaci pohonu rozvádění.

1.2 Matematický model rozváděcí tyče

Při řešení modelu rozváděcí tyče jsme vyšli z naměřených dat na stroji BT. Z oscilací rychlosti změřené v místě „A“ tedy na bližším konci tyče jsme odečetli amplitudu a periodu kmitů.

Pro výpočet tuhosti tyče a tlumení jsme vyšli z mechanické rovnice:

$$[1.1.] \quad m\ddot{x} + k\dot{x} + cx = u(t)$$

zkrácením celé rovnice m a zavedením konstant

$$[1.2.] \quad 2N = \frac{k}{m}$$

$$[1.3.] \quad \Omega^2 = \frac{c}{m}$$

dostáváme rovnici ve tvaru,

$$[1.4.] \quad \ddot{x} + 2N\dot{x} + \Omega^2 x = u(t)$$

řešením charakteristické rovnice

$$[1.5.] \quad \lambda^2 + 2N\lambda + \Omega^2 = 0$$

dostáváme vlastní čísla ve tvaru

$$[1.6.] \quad \lambda_{1,2} = -N \pm \sqrt{N^2 - \Omega^2}$$

mohou nastat pouze následující tři případy:

$$[1.7.] \quad N > \Omega \text{ neboli } \delta = \frac{N}{\Omega} > 1,$$

$$[1.8.] \quad N = \Omega, \text{ tedy } \delta = \frac{N}{\Omega} = 1$$

konečně pro podkritické tlumení $\delta < 1$, kdy jsou vlastní čísla

$$[1.9.] \quad \lambda_{1,2} = -N \pm i\Omega_1$$

kde Ω_1 je frekvence tlumených kmitů,

$$[1.10.] \quad \Omega_1^2 = \Omega^2 - N^2$$

Řešení hledáme ve tvaru

$$[1.11.] \quad x = e^{-Nt} c \sin(\Omega_1 t + \varphi_0)$$

Z poměru dvou amplitud

$$[1.12.] \quad \frac{x(t+nT)}{x(t)} = \frac{c \cdot e^{-N(t+nT)} \sin(\Omega_1(t+nT) + \varphi_0)}{c \cdot e^{-Nt} \sin(\Omega_1 t + \varphi_0)} = e^{-NnT}$$

Pokud uvažujeme dvě po sobě jdoucí amplitudy dosazujeme $n=1$ a zjednodušením $\Omega_1 = \Omega$, dostáváme

$$[1.13.] \quad \ln \frac{x(t)}{x(t+T)} = NT = konst.$$

V našem případě jsme odečetli z naměřených hodnot jak hodnoty $x(0)$, $x(1)$, tak i časy $t(0)$ a $t(1)$, jejichž odečtením jsme získali T . Po dosazení a numerickém výpočtu dostáváme $f_1=29,24$ [Hz], koeficient $N=3,03$ [$N \cdot m^{-1} kg^{-1}$], tuhost pružiny

$$[1.14.] \quad c = m \cdot \Omega^2 = 228336,49 \text{ [Nm}^{-1}\text{]}$$

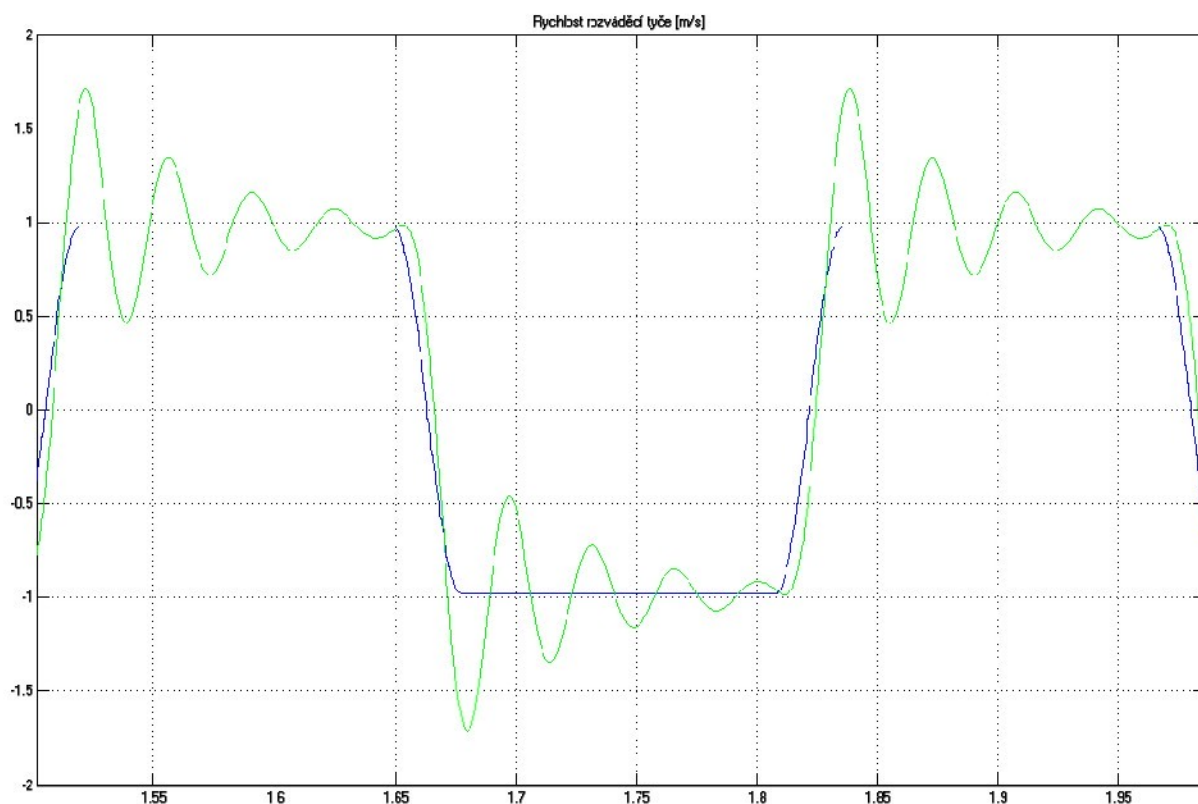
kde za m jsme dosadili 6,77 kg, což odpovídá hmotnosti tyče bez hnacího ústrojí nejdelší verze stroje složeného z dvaceti sekcí, a koeficient tlumení

$$[1.15.] \quad k = \frac{\ln 2}{\pi} \sqrt{c \cdot m} = 274,22 \text{ [Nsm}^{-1}\text{]}$$

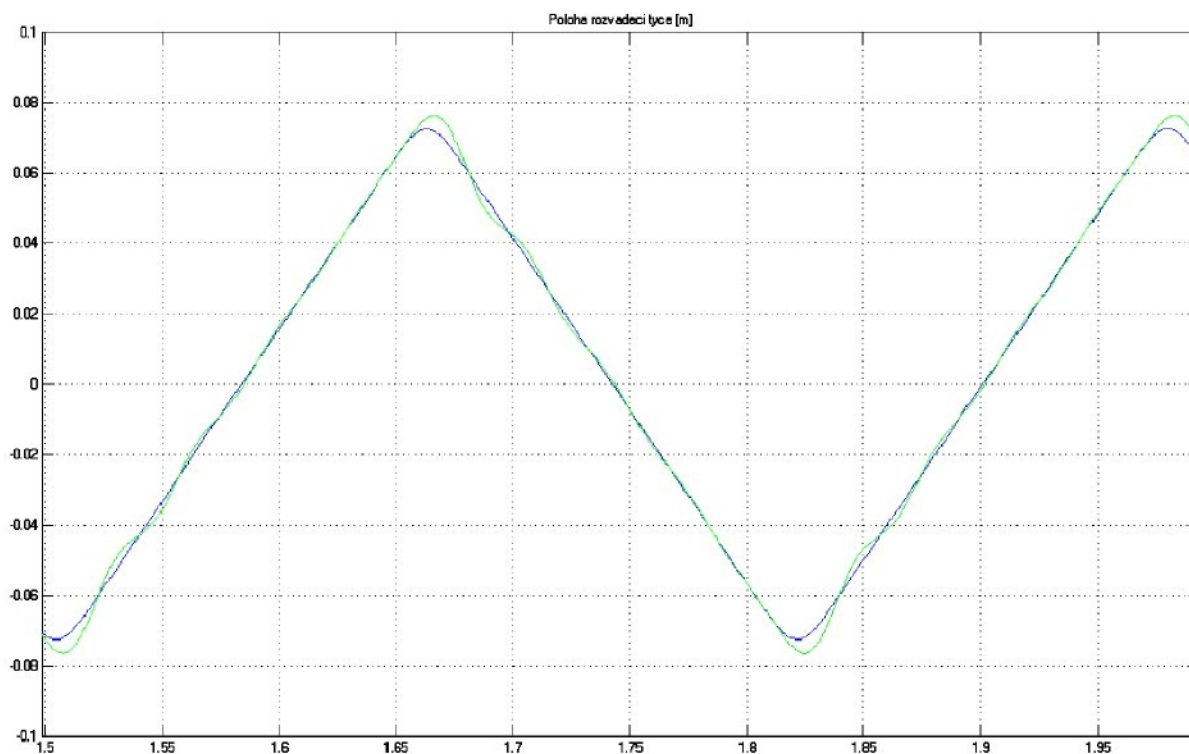
koeficient poměrného tlumení

$$[1.16.] \quad \delta = \frac{N}{\Omega} = 0,0165.$$

Na základě vypočtených parametrů tuhosti a tlumení byl sestaven matematický model, kde celá tyč byla nahrazena jedním hmotným bodem na pružině a tlumiči. Jako buzení modelu jsme využili předepsané funkce trajektorie vačky.



Graf 2 – Rychlost rozváděcí tyče v závislosti na čase



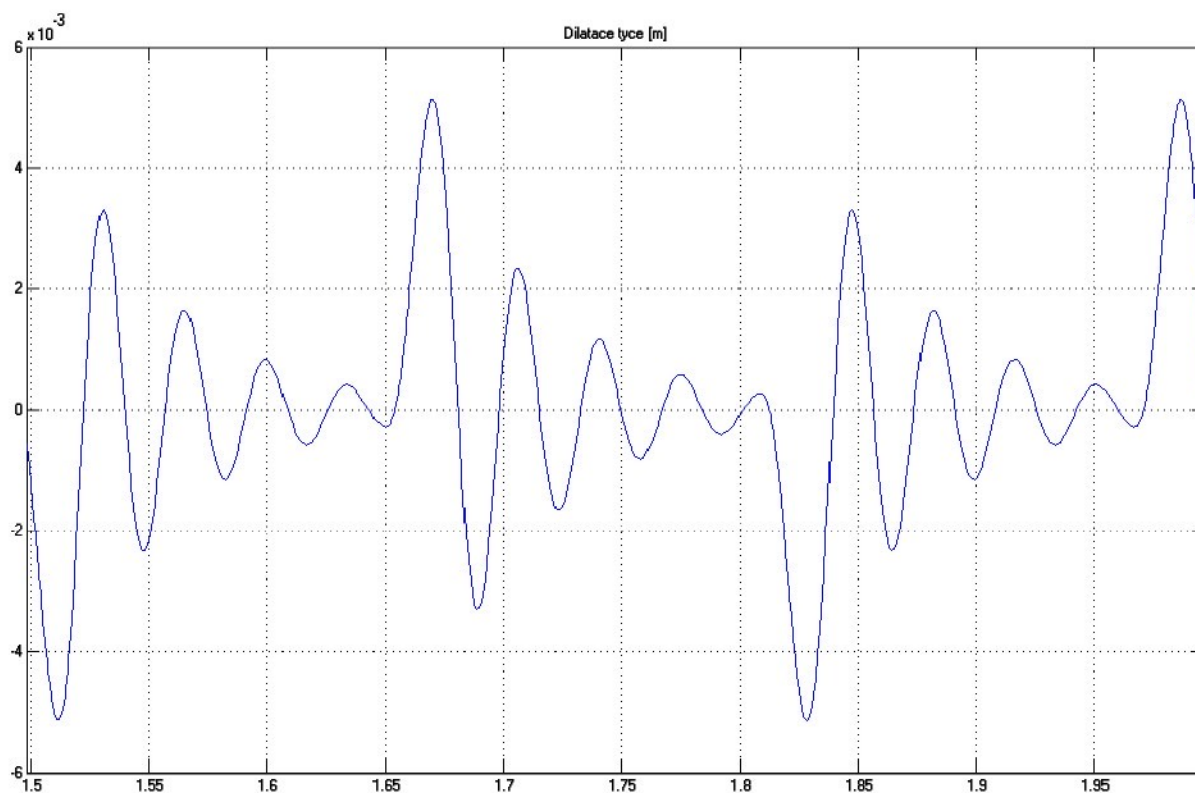
Graf 3 – Průběh polohy tyče v čase

Modrý průběh je předepsaná poloha vačky, zelený je modelovaný průběh rozváděcí tyče s konečnou tuhostí. V zeleném průběhu jsou dobře patrné oscilace způsobené konečnou tuhostí rozváděcí tyče.

Identifikaci pomocí logaritmického dekrementu jsme provedli i pro vzdálenější konec rozváděcí tyče. Zde jsme dostali hodnoty $f_1=27,78$ [Hz], koeficient $N=3,16$ [$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}\text{kg}^{-1}$], tuhost pružiny $c=206077$ [Nm^{-1}] a koeficient tlumení $k=260.508$ [Nsm^{-1}] koeficient poměrného

tlumení $\delta = \frac{N}{\Omega} = 0,0181$.

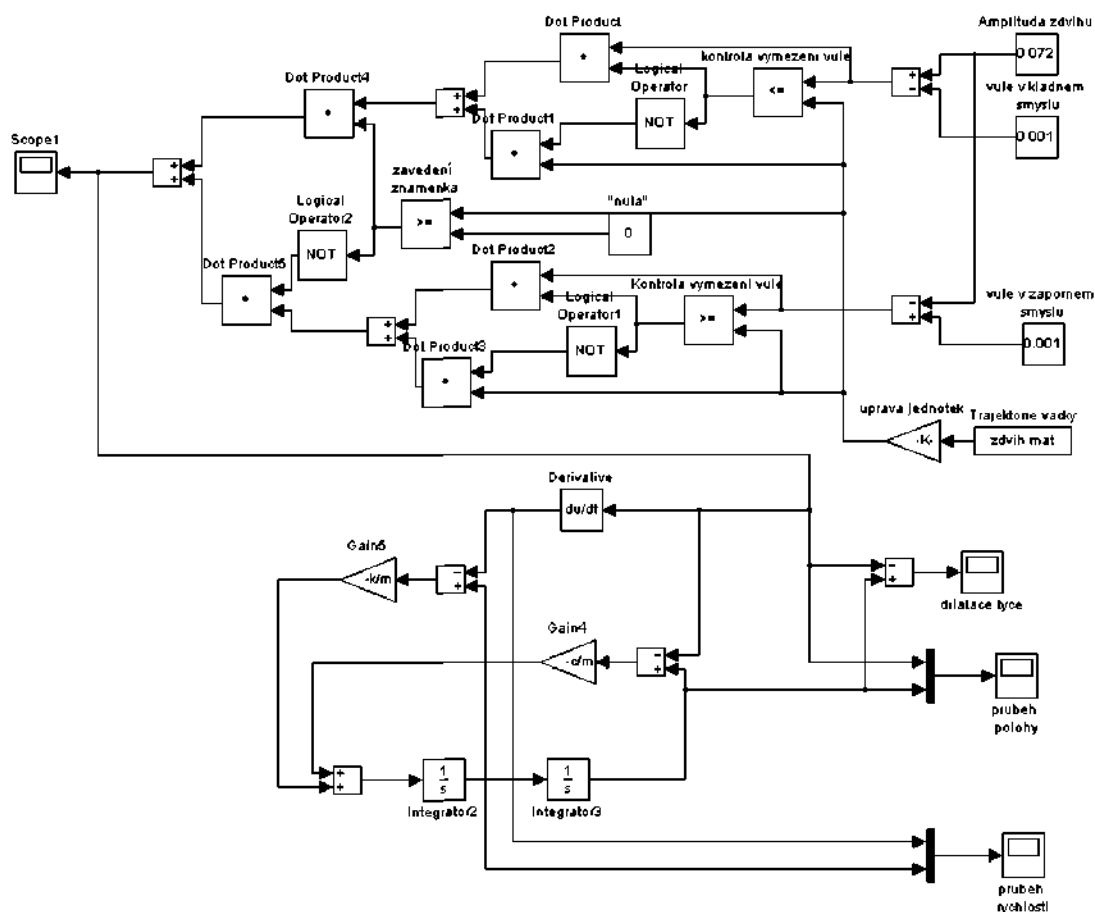
V místě B je tuhost tyče nižší, což odpovídá teoretickým předpokladům. Simulované hodnoty odpovídají naměřeným průběhům.



Graf 4 – Dilatace tyče (rozdíl polohy vzdálenějšího konce tyče a požadované hodnoty)

Při kmitavém pohybu rozváděcí tyče dochází vlivem vlastní tuhosti ke zpoždění aktuální polohy vzdálenějšího konce vůči aktuální poloze vačky. Tento rozdíl je vyneseno v grafu 4.

Rovněž byl prověřen vliv vůlí na hnacím mechanismu a to v několika krocích. Simulační schéma dovoluje zadat odlišnou vůli při přechodu z kladného směru do záporného a naopak.



Graf 5 – Simulační schéma zahrnující vliv vůlí

Vliv vůlí se při modelování chování tyče projeví pouze nepatrně. To je způsobeno poměrně vysokým ztlumením systému. Parazitní zákmity jsou dobře patrné zejména v průběhu rychlosti ale při vůli v řádu milimetrů, což je pouze experimentální případ.

Vlastní frekvence se blíží naměřené frekvenci kmitů na tyči. V modelu se neprojevují další naměřené frekvence, neboť tyč je nahrazena jen jednohmotovým systémem. Pokud tuhost tyče vynásobíme posunutím, dostáváme hodnotu zatěžující síly. Tato síla také odpovídá naměřeným hodnotám.

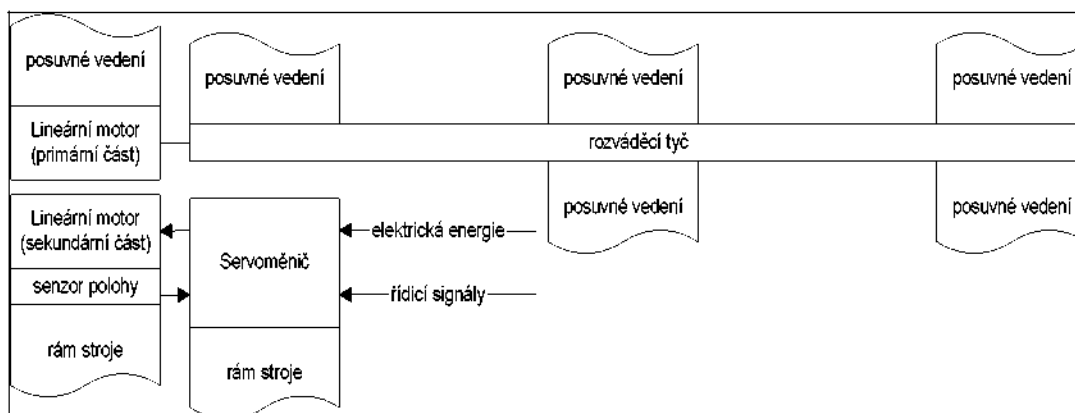
2 Nové možnosti řešení pohonu rozvádění

Koncepce modernizace rozvádění lze rozdělit do dvou základních směrů. První z nich se snaží využít společného pohonu pro více doprůvacích míst, sekci nebo až jednu stranu stroje. Je to koncepce skupinového rozvádění.

Druhý, individuální rozvádění řeší polohování příze v rámci jediného místa. Výhodou skupinového rozvádění je malá cena pohonu na jedno rozváděcí místo. Individuální rozvádění umožňuje docílit vyšší kvality náviny. Cena pohonu na jedno rozváděcí místo je ale vyšší než v případě skupinového rozvádění.

2.1 Možnosti skupinového rozvádění

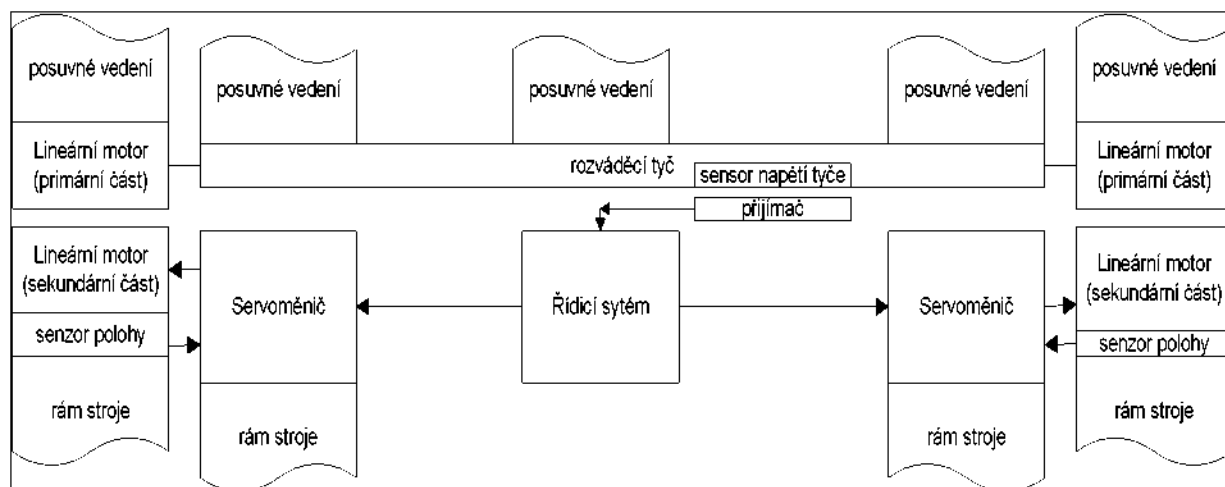
Jednou z možností jak modernizovat pohon skupinového rozvádění je využití lineárního pohonu. Předpokládá se nasazení lineárního pohonu jako náhrady rotačního pohonu a mechanismu s drážkovým válcem. Lineární pohon by opět poháněl rozváděcí tyč s vodiči příze.



Obr. 2.1 – Modernizace stávající koncepce stroje pomocí lineárního pohonu

Tento způsob modernizace by umožnil snadnou změnu parametrů náviny pomocí řídicích signálů, ale neodstranil by vliv rozváděcí tyče. Náviny na hnaném a volném konci by měly různé vlastnosti.

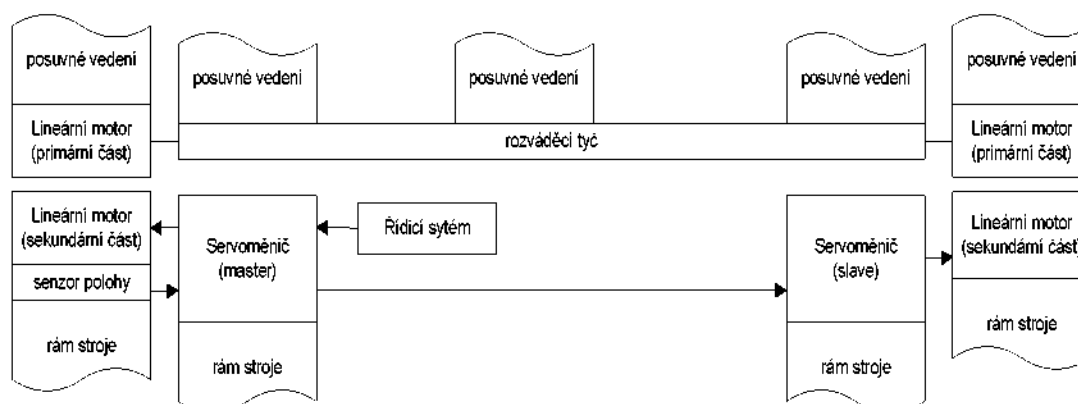
Další dva způsoby modernizace předpokládají nasazení lineárních motorů na obou stranách tyče^[1].



Obr. 2.2 - Modernizace stávající koncepce stroje pomocí lineárního pohonu

První způsob využívá dvou samostatných lineárních pohonů s tím, že oba jsou řízené z nadřazeného systému, do kterého vstupuje signál ze senzoru napětí tyče. Na základě požadované polohy a hodnoty napětí tyče jsou oba pohony řízeny autonomně tak, aby převládající zatížení bylo vždy tahové. Tím se odstraní problémy s přičlením rozváděcí tyče.

Druhý způsob je jednodušší a využívá master-slave režimu u lineárních pohonů.



Obr. 2.3 - Využití master/slave režimu lineárního pohonu

V inicializační části by pohony fungovali autonomně. „Master pohon“ by byl zaparkován a na „Slave“ pohonu bychom omezili maximální proud. Po tomto omezení bychom emulovali na vstupu polohového senzoru na levou krajní polohu, zatímco žádaná poloha by byla zadána na pravou krajní polohu. Motor by se tedy rozjel vpravo ale s omezeným momentem. Výsledkem by bylo předeptnutí rozváděcí tyče a vymezení vůlí. Po krátkém čase, řádově desítek milisekund, by byla aktuální poloha zapamatována a pohon zaparkován v této poloze. Poté by byly pohony nakonfigurovány řídicím systémem do režimu master/slave a upraven maximální proud na slave pohonu. Dále by pohony pracovaly synchronizovaně v master/slave pohonu. Využívali bychom prvotního předeptnutí. Výhodou tohoto uspořádání je využití pouze jednoho čidla polohy a odstranění senzoru napětí tyče. Pokud by se ale změnila celková délka tyče, například vlivem teplotní dilatace, změnilo by se i předpětí tyče. Bylo by tedy nutné inicializační část po určité době opakovat.

Díky sofistikovanému řízení na základě informace o aktuálním proudu v levém a pravém pohonu bychom mohli regulovat napětí v tyči na požadovanou hodnotu, bez nutnosti provádět opakovaně inicializační sekvenci. Podobného principu se dnes využívá při silově-momentovém řízení průmyslových robotů.

Při stávajícím mechanickém řešení je potřebné pohybovat značnou setrvačnou hmotou. Další přírůstek setrvačné hmoty je vlastní primární část lineárního pohonu. Válcová vačka v současné době slouží jako setrvačnik a také jako převodovka snižující vliv zátěže na rotační pohon. Jejím odstraněním bude zátěžná síla působit přímo na primární část lineárního pohonu.

Modernizovat pohon rozvádění konvenčními rotačními pohony je možné při náhradě válcové vačky kuličkovým šroubem. Tato sestava by dovolovala elektronickou parametrizaci, ale kuličkový šroub by měl vyšší moment setrvačnosti než speciální válcová vačka a navíc by pohyb rotačního pohybu bylo nutno reverzovat. To by přineslo malou dynamiku v úvratích pohybu a analogické problémy se stávajícím stavem. Proto je řešení s konvenčními rotačními pohony nevhodné.

Oproti tomu pokrok v konstrukci i řízení lineárních pohonů umožňuje dosáhnout vysoké dynamiky i vysoké trvalé síly pomocí relativně malého proudu a tím zvýšit účinnost lineárních pohonů, snížit ztrátový výkon a tedy i požadavky na chlazení motorů.

2.2 Matematický model elektrodynamického motoru

Pro popis elektrodynamického systému byl vypracován matematický model, na kterém lze simulovat požadavky na napájení v závislosti na zatížení aktuátoru. Rovněž byl vypracován matematický model tyče, který má za cíl emulovat zátěž pohonu.

Při popisu elektrodynamického systému lze do jisté míry využít analogie se stejnosměrným motorem s cizím buzením.

Pro vlastní popis využijeme dvě základní diferenciální rovnice, mechanickou rovnici (2.1) a elektrickou rovnici (2.2).

$$(2.1) \quad m\ddot{x} + D\dot{x} + Fz(t) = Fm(t)$$

kde m je hmotnost pohybující se části pohonu, D reprezentuje koeficient tlumení, Fz představuje časově proměnnou zátěžnou sílu, Fm představuje sílu vyvolanou elektrodynamickým převodníkem.

$$(2.2) \quad u(t) = L \frac{di}{dt} - Bl\dot{x} + Ri(t)$$

První člen elektrické rovnice reprezentuje hodnotu indukovaného napětí vlivem změny napájecího proudu, druhý generátorické účinky závitů pohybujících se v magnetickém poli a třetí úbytek napětí na odporu vodiče cívky.

Sílu elektrodynamického převodníku můžeme vyjádřit vztahem (2.3) za předpokladu, že neuvažujeme demagnetizační účinky proudu (2.4).

$$(2.3) \quad Fm(t) = Bi(t)l$$

$$(2.4) \quad \frac{dB}{di} = \text{const.}$$

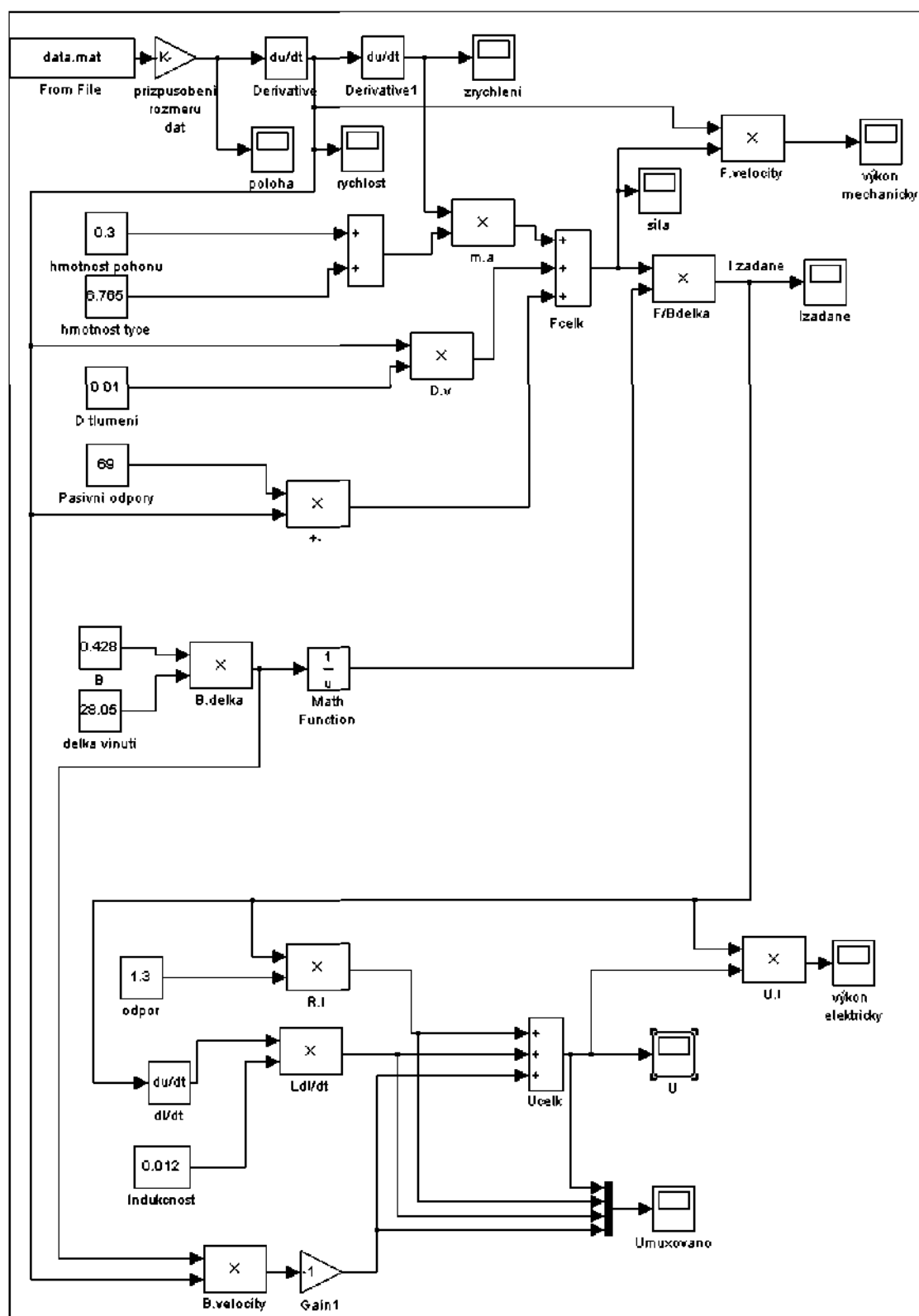
Rovnice (2.5) a (2.6) vyplývají z konstrukčního upořádání převodníku. Počet činných závitů ve vzduchové mezeře a indukčnost cívky v závislosti na poloze jsou konstantní.

$$(2.5) \quad \frac{dl}{dx} = \text{const.}$$

$$(2.6) \quad \frac{dL}{dx} = \text{const.}$$

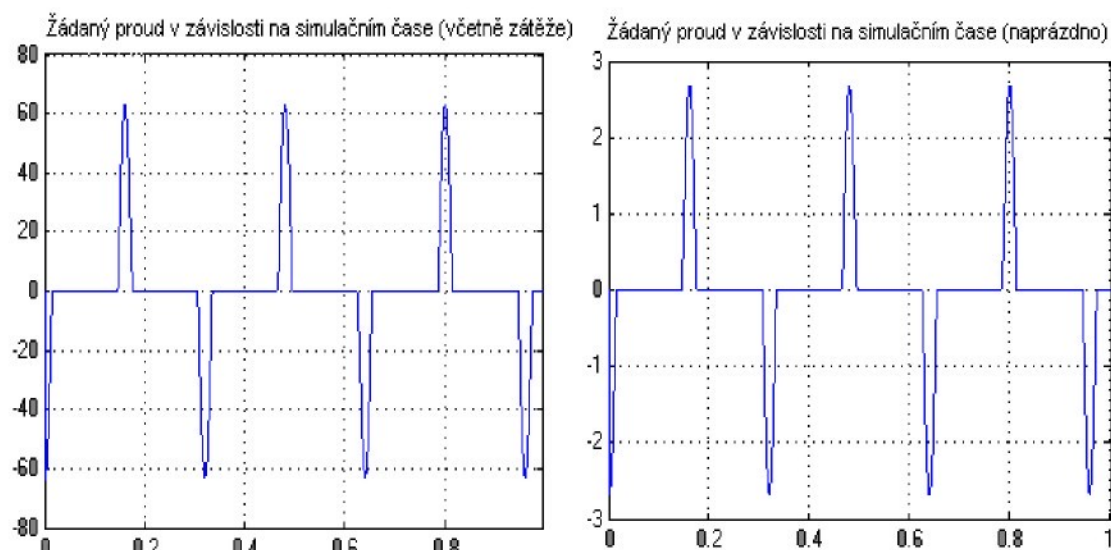
Vzhledem k tomu, že požadovaná trajektorie je známá a zadaná, chtěli jsme určit časový průběh napájecího napětí cívky. Protože analytické řešení také úlohy by bylo náročné, využili jsme program MatLab-Simulink k modelování chování pohonu ve stavu naprázdno a při zatížení.

Ze zadané trajektorie x snadno určíme $\dot{x}$ a $\ddot{x}$, dále s využitím rovnic (2.1) a (2.2) vyjádříme požadovanou hodnotu napájecího proudu a poté hodnotu napájecího napětí pro pohon.

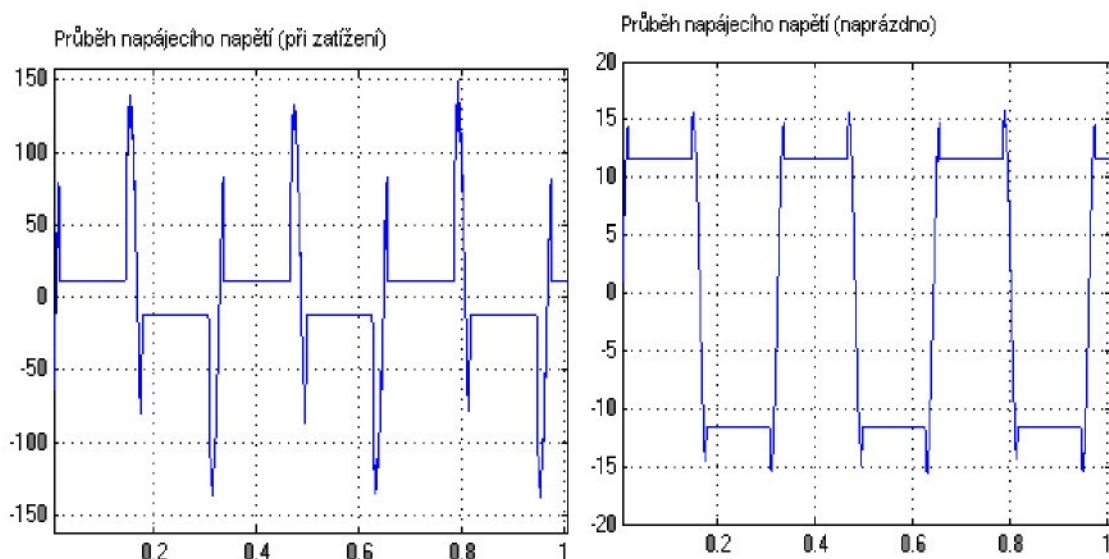


Obr. 2.4 - Simulační schéma elektrodynamického motoru

Pro buzení pohonu jsme využili předepsanou zdvihovou závislost válcové vačky. Dále jsme do modelu zahrnuli vliv pasivních odporů vedení tyče určené měřením. Vlastní rozváděcí tyč jsme nahradili hmotným bodem, který spolu s pasivními odpory představuje zátěžnou sílu.



Graf č. 1 – Porovnání požadovaného proudu (A) naprázdno a při zatížení



Graf č. 2 – Porovnání požadovaných napětí (V) při chodu naprázdno a při zatížení

Hodnoty rychlosti a zrychlení se blíží hodnotám naměřeným na rozváděcí tyči. Ve výsledcích jsou patrné „oscilace“ jak v rychlosti, tak zejména ve zrychlení, což je dáno numerickou derivací stupňovitě zadané funkce zdvihu.

Pro napájení motoru naprázdno je špičkový proud $2,7A$ a délka tohoto pulsu cca $0,02s$. Při předpokládaném zatížení rozváděcí tyčí je to již $63A$, délka pulsu je stejná. Špičkové hodnoty napětí jsou potom $140V$ a trvalé napětí je $15V$. Při modelování při zatížení byly zanedbány pasivní odpory tyče. Ty jsou ve srovnání s dynamickou zátěžnou silou vyvolanou rozváděcí tyčí zanedbatelné.

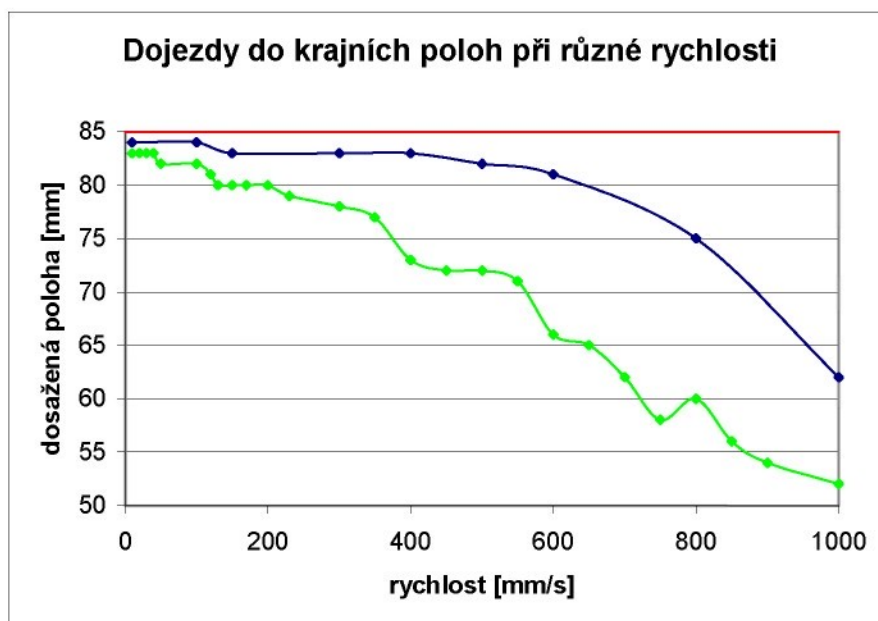
Hodnoty získané z modelu při zatížení jsou spíše demonstrativní. Stávající cívka není dimenzovaná na špičkové proudy. Při změně parametrů cívky, tj. odporu, indukčnosti, aktivní délce závitu, bude nutné model přepočítat. Struktura modelu se nemusí modifikovat, stačí pouze zadat nové parametry.

3 Výsledky funkčních zkoušek

Motor má poměrně dobrou dynamiku, ta je zajištěna dobrou regulací proudového regulátoru. Z hlediska vstupu žádané polohy je ale chování horší. Kvůli nevhodnému systému odměřování polohy není možné nastavit přiměřené zesílení rychlostního regulátoru, proto motor při vysokých požadovaných rychlostech nedojíždí do krajních poloh. Situaci demonstrujeme pro dvojí nastavení regulátorů. Jedna z úvratí byla nastavena na 85mm. Testovali jsme absolutní odchylku dojezdů do krajní polohy při různých žádaných rychlostech pro dvojí nastavení regulátorů Tab. 3.1.

kpol	kv	ki	průběh
5	0,06	0,4	zelený
7	0,11	0,5	modrý
14	0,2	0,8	nestabilní

Tab. 3.1 – Nastavení regulátorů pro testování



Graf 3.1 - Dojezdy do krajní polohy pro různé nastavení podle Tab. 3.1

V grafu, Graf 3.1, jsou zobrazeny tři průběhy. Rudý je ideální průběh kterého nelze v praxi dosáhnout. Zelený průběh odpovídá neagresivnímu nastavení regulátorů a je zde dobře patrná nepřesnost v dojezdu polohy na rychlosti 600mm/s. Oproti tomu modrý průběh zobrazuje korektní dojezdy až do rychlosti 600mm/s a pak následuje útlum. Z grafu je patrná závislost kvality regulace na nastavení regulátorů.

Pro další zkvalitnění regulace bylo zejména nutné zlepšit odměřování polohy, neboť rychlost počítáme numericky derivací. Vzhledem k vysokým hodnotám spínaného proudu byla informace z magnetostrikčního čidla s analogovým výstupem zarušena, což způsobovalo problémy při numerické derivaci. Po náhradě IRC čidlem s 200 pulzy/mm byl tento problém odstraněn.

Dalším zlepšením byla změna odměřování proudu pomocí LEM LTS 25. Jedná se v podstatě o měřicí transformátor s analogovým výstupem. Modul řízení proudu se nám tím rozložil do dvou zcela nezávislých částí, proudového omezení v obvodu budiče FETů a odměřování

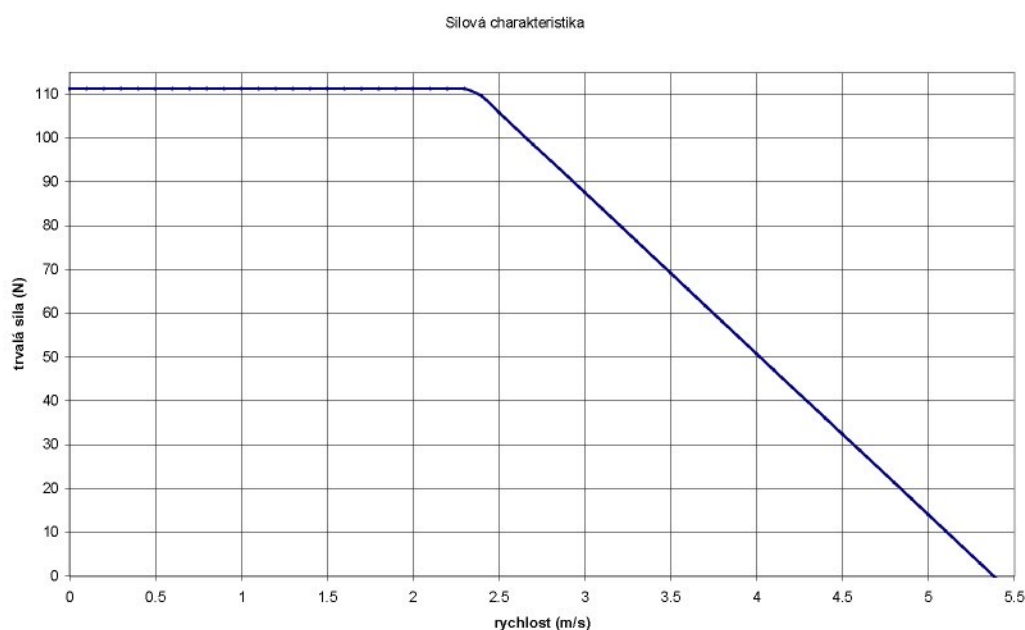
proudu LEM. Tato náhrada nám umožňuje získat směr průchodu proudu přímo z měření, odpadá tedy nutnost estimace v signálovém procesoru.

Pohon v současném uspořádání má tyto parametry:

Špičková síla @ 0.02s	111.25	[N]
Trvalá síla	53.4	[N]
Špičkový proud @ 0.02s	25	[A]
Trvalý proud	12	[A]
Max. napájecí napětí	36	[V]
Typ. napájecí napětí	24	[V]
Silová konstanta	4.45	[N/A]
Elektrická konstanta	4.46	[V/m/s]
Odpor vinutí @ 21°C	0.4	[Ohm]
Odpor vinutí @ 100°C	0.54	[Ohm]
Indukčnost vinutí @ 1kHz	27	[mH]
Max. teplota vinutí	115	[°C]
Max. teplota rotoru	125	[°C]
Max. zrychlení	371	[]
Max. teoretická rychlost	5.38	[]
Maximální zdvih	120	[mm]
Hmotnost pohyblivých částí	300	[g]

Tab. 3.2 – Parametry elektrodynamického pohonu s cívkou 2

Vzhledem k nemožnosti změřit silovou charakteristiku na reálném zařízení, provedli jsme výpočet na matematickém modelu při respektování proudových a napěťových omezení reálného pohonu.



Graf 3.2 – Silová charakteristika elektrodynamického pohonu

Část průběhu s konstantní silou je definována zejména silovou konstantou motoru a dovolenou hodnotou trvalého proudu. Ta je omezena maximálním ztrátovým výkonem cívky,

jejím dovoleným oteplením, volbou spínacích součástek, proudovým odměřováním a proudovým omezením. Umístění kolena charakteristiky a sklon jejího útlumu závisí na elektrické konstantě pohonu a velikosti napájecího napětí. S rostoucím napětím se koleno posouvá k vyšším rychlostem, ale zároveň klesá přesnost řízení PWM.

4 Závěr

Disertační práce se zabývá možnostmi uplatnění elektrodynamického pohonu jako jednoduchého lineárního motoru malého výkonu. Přínosem jsou zejména matematické modely, které se dají využít při dimenzování reálného pohonu. Práce obsahuje i praktický výstup v podobě prototypu elektrodynamického pohonu řízeného v uzavřené regulační smyčce pomocí signálového procesoru.

V teoretické části byl vypracován matematický model rozváděcí tyče doprřadacího stroje, který lze použít pro dimenzování, simulaci provozního stavu a nastavení regulačních algoritmů libovolného pohonu v této aplikaci.

Disertační práce rovněž obsahuje praktické ověření funkčního principu i matematický model elektrodynamického pohonu. Dále byly prozkoumány možnosti řízení v otevřené i uzavřené regulační smyčce. Při konstrukci funkčních modelů byly využity různé principy měřících systémů polohy. Rovněž byly ověřeny možnosti řízení elektrodynamického pohonu v otevřené regulační smyčce za použití jednoduchého mikrokontroléru.

Elektrodynamický systém má zásadní výhodu v jednoduchosti jeho konstrukce a konstantním momentu po celé dráze. Díky jediné napájené cívce je i jednoduchá regulační struktura obsahující pouze jediný proudový regulátor. Konstrukční uspořádání elektrodynamického motoru s jedinou cívkou má ovšem zásadní nevýhodu. Činná část cívky, tvořící sílu motoru, je ta mezi pólovými nástavci. Zbývající část tvoří pouze parazitní indukčnost a odpor. Proto se elektrodynamický systém nedá využít pro zajištění dlouhého zdvihu či vysokých dynamických nároků.

Tyto nedostatky odstraňují lineární synchronní elektromotory v pístnicovém provedení. Mají jednoduchou konstrukci, oproti klasicky uspořádaným lineárním pohonům nulovou přitažlivou sílu mezi primární a sekundární částí. V posledních letech, díky pokroku v materiálovém inženýrství a výrobních technologiích pro výrobu permanentních magnetů, jsme schopni relativně malým proudem docílit velké síly. Tím dochází ke snížení ztrátového výkonu na vinutí a odpadají problémy s chlazením, které se vyskytovaly u předchozí generace lineárních pohonů. Proto bych při řešení dynamicky náročných aplikací v textilním průmyslu volil synchronní pístnicové servopohony.

Disertační práce ukazuje možnosti jednoduché mechanické koncepce elektrodynamického pohonu, která je podporována moderním způsobem řízení výkonu a výkonným řídicím systémem založeným na digitálním signálovém procesoru a uživatelským softwarem v nadřazeném řídicím systému.

Výběr z informačních zdrojů

- [1] SLOUPENSKÝ, Jiří, KUBEŠ, Vítězslav. Způsob rozvádění příze při navíjení příze na cívku a zařízení k rozvádění příze: PV2002-3430,PS3352CZ. Ústí nad Orlicí: Rieter CZ a.s., 2002.
- [2] SOUČEK, Pavel. *Servomechanismy ve výrobních strojích*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02902-6
- [3] JAVŮREK, Jiří. *Regulace moderních elektrických pohonů*. Praha: Grada publishing a.s., 2003. ISBN 80-247-0507-9
- [4] KVASNICA, Jozef. *Mechanika*. Praha: Academia – nakladatelství České akademie věd, 2004. ISBN 80-200-1268-0
- [5] LONGORIA, Raul.G.. *Experimental Determination of Parameters for a Linear Second Order System*. Austin: The university of Texas, Department of Mechanical Engineering, 2000
- [6] VOREL, Pavel. *Výkonové elektromechanické systémy v silničních vozidlech*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2005.
- [7] FOUNĚ, František. *Rozvádění příze vačkou při navíjení na bezvřetenovém doprácím stroji: Výpočtová zpráva*. Liberec: VUTS Liberec a. s., 2003
- [8] KLÁN, Petr. Metody zlepšení PI regulace. *Automa*, 2001, číslo 12, ISSN 1210-9592
- [9] BENDA, Vítězslav. *Výkonové polovodičové součástky a integrované struktury*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1993. ISBN 80-01-01140-2
- [10] POMPE, František. *Teorie soukání*. Praha: Nakladatelství České akademie věd, 1958.
- [11] Synchronous Linear Motor LSF: Project Planning Manual, Selection Data and Commissioning. Lohr a. Main: Rexroth Indramath GmbH, 2000.
- [12] DRAXLAR, Karel. *Magnetické prvky*. Praha: Ediční středisko ČVUT, 1984.
- [13] *Měření na stroji BT 903 FXL*. Liberec: Výzkumný ústav textilních strojů, 2003.
- [14] BT 905: Reliable, economical alternative in rotor spinning. Ústí nad Orlicí: Rieter Elitex a.s.,2003
- [15] FRANZOLINI, Luciano: Device and apparatus with magnetic thread: Guide for winding a thread onto cylindrical supports. United States: Patent application publication, 2004
- [16] BARON, Alée Charles: Reciprocating mechanism for winding thread: WO 03/002443 A1. Valence Cedex: Rieter ICBT, 2003

Vlastní díla z oblasti aplikovaného výzkumu a průmyslového vývoje

Ve spolupráci s firmou Rieter CZ a.s. Ústí nad Orlicí pracuje na projektu Ministerstva průmyslu a obchodu,

Na Technische universität Chemnitz realizoval projekt Řízení průmyslových robotů za pomoci externí senzoriky, řízení průmyslového angulárního robota pomocí průmyslové kamery

Podílel se na realizaci mobilního robota, Vozík pro manipulaci s oválnou konví“ (nasazení elektronicky komutovaných stejnosměrných motorů s ovládacími jednotkami „e-motion“ a vyhodnocení provozu z baterií), VÚTS a. s.

Vývoj a realizace přípravku na bázi CPLD (complex programmable logic device) obvodů Xilinx řady XC95, VÚTS a. s.

Parametrizace měničů Telemecanique Altivar na stroji „Leštění šatonů“, VÚTS a. s., Turnex, spol. s r. o.

Automatizace měření „Distribuce tlaku ve vlákenných systémech“, Technická Univerzita v Liberci

Publikace

ČERNOHORSKÝ, J. *Visual servoing - Auto Camera Calibration Toolbox* Chemnitz 2006: Technische Universität Chemnitz

ČERNOHORSKÝ, J. *Možnosti visual servoingu robota Stäubli pomocí Matlabu*. EPVE 2006 Elektrické pohony a výkonová elektronika Brno 2006, VUT Brno

ČERNOHORSKÝ, J. *Dílčí zpráva o vývoji elektrodynamického pohonu*. Liberec 2006: VUTS Liberec

ČERNOHORSKÝ, J. *Possibilities of visual servoing Stäubli robot using MathLab development environment*. Chemnitz 2005: Technische Universität Chemnitz

ČERNOHORSKÝ, J. *Dílčí zpráva o projektu Vozík pro manipulaci s oválnou konví: měření elektrických charakteristik akumulátorového vozíku*. Liberec 2005: VUTS Liberec

ČERNOHORSKÝ, J. *Zpráva o vývoji elektrodynamického pohonu*. Liberec 2004: VUTS Liberec

ČERNOHORSKÝ, J. *Identifikace parametrů rozváděcího mechanismu a simulace chování na jednohmotovém modelu*. Liberec 2004: VUTS Liberec

ČERNOHORSKÝ, J. *Polohování pomocí elektrodynamického systému*. Liberec 2004: VUTS Liberec

ČERNOHORSKÝ, J., STŘEŠTÍK, P. *Možnosti zlepšení rozvádění na stroji řady BT*. Liberec 2003: VUTS Liberec