TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Systém řízení pohonu jehelních tyčí

DIPLOMOVÁ PRÁCE

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Systém řízení pohonu jehelních tyčí

Needle bar drive control system

Bc. Petr Váša

Studijní program:	N2612 – Elektrotechnika a informatika
Studijní obor:	3902 T 005 – Automatické řízení a inženýrská informatika
Pracoviště :	Ústav mechatroniky a technické informatiky
	Fakulta Mechatroniky, informatiky a mezioborových studií
	Technická univerzita v Liberci Studentská 2, 461 17 LIBEREC 1
Vedoucí: Konzultant:	doc. Ing. Pavel Rydlo, CSc. prof. Ing. Jaroslav Beran, CSc.

Rozsah diplomové práce

Rozsah příloh diplomové práce

Počet stran:	62
Počet obrázků:	30
Počet tabulek:	7

Počet stran: 14 Počet obrázků: 22 TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	Bc. Petr VÁŠA
Studijní program:	N2612 Elektrotechnika a informatika
Studijní obor:	Automatické řízení a inženýrská informatika
Název tématu:	Systém řízení pohonu jehelních tyčí
Zadávající katedra:	Ústav mechatroniky a technické informatiky

Zásady pro vypracování:

- 1. Analyzujte současný stav řízení pohonu jehelních tyčí pro šicí proces se systémem plovoucí jehly.
- 2. Navrhněte vhodný typ krokového motoru pro pohon jehelní tyče.
- 3. Navrhněte metodu řízení krokového motoru pro zadané parametry a ověřte dynamické chování jehelní tyče v její úvrati při předání jehly.
- 4. Zajistěte synchronizaci obou motorů a stanovte způsob určení referenční polohy tyče.
- 5. Ověřte systém řízení při procesu šití na reálném funkčním modelu.

Rozsah grafických prací: dle potřeby dokumentace Rozsah pracovní zprávy: Forma zpracování diplomové práce:

cca 40 stran tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

[1] Jaroslav Balátě: Automatické řízení. BEN, Praha, 2004

Vedoucí diplomové práce:

Konzultant diplomové práce:

doc. Ing. Pavel Rydlo, Ph.D. Ústav mechatroniky a technické informatiky prof. Ing. Jaroslav Beran, CSc. Katedra textilních a jednoúčelových strojů

Datum zadání diplomové práce: 16. října 2009 Termín odevzdání diplomové práce: 21. května 2010

prof. Ing. Václav Kopeck děkan



doc. Ing. Petr Tůma, CSc. vedoucí ústavu

V Liberci dne 16. října 2009

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **souhlasím** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

V Liberci 15. 5. 2010

.....

Abstrakt

Systém řízení pohonu jehelních tyčí

Petr Váša

Předmětem této práce je ověření použitelnosti krokového motoru v dynamicky náročné aplikaci. Předpokládanou oblastí použití je textilní průmysl, kde cena pohonu hraje významnou roli. Krokový motor je proto zkoumán jako cenová alternativa dražšího synchronního servomotoru v aplikaci pohonu jehelní tyče průmyslového šicího stroje. Dynamické chování poháněného mechanismu je aproximováno lineárním modelem, který je získán experimentální identifikací. S využitím tohoto modelu je provedena optimalizace zdvihové funkce mechanismu s cílem minimalizovat nežádoucí překmity jehelní tyče. Metoda použitá při optimalizaci je založena na dopředném řízení bez zpětné vazby.

Pro praktické ověření metody řízení je navržena experimentální řídicí jednotka, která umožňuje synchronizované řízení dvou pohonů. Jejím hlavním přínosem je schopnost generovat průběhy s obecným průběhem zrychlení. Dále je navržen způsob nalezení referenční polohy tyče, který nevyžaduje speciální snímač polohy. Navržená metoda řízení je prakticky ověřena s jedním vybraným typem krokového motoru na funkčním modelu stroje. Výsledné parametry pohonu s krokovým motorem sice nedosahují kvalit servomotoru, při nižších nárocích na rychlost stroje se přesto může jednat o cenově zajímavou variantu.

Klíčová slova

Krokový motor, identifikace, optimalizace, řízení, synchronizace.

Abstract

Needle bar drive control system

Petr Váša

The aim of this work is applicability verification of a step motor in applications with a high dynamic load. The target area of usage is a textile industry, where the price of a drive is significant. The step motor is therefore designed as a low-cost alternative to a synchronous servodrive in application of needle bar drive on an industrial sewing machine. Dynamic behaviour of driven mechanism is approximated with a linear model, whose parameters are obtained by an experimental identification. The model is used to optimise the exciting function of the driven mechanism with the aim of minimize undesirable overshoots of the needle bar. The optimisation method is based on an inverse filter for the forward control without a feedback loop.

For a practical verification of the control method it is designed an experimental control unit, which is capable of the synchronized control of two drives. Main contribution of this control unit is its ability to generate speed profiles with general acceleration curve. Also it is designed and verified a method for a needle bar reference position search without a need of a special position sensor. The designed control method is verified on a sewing machine function model with one selected type of a step motor. Obtained technical parameters of the step motor drive do not achieve qualities of a synchronous servodrive, but it may be an interesting price variant in case of low-speed machine demands.

Keywords

Step motor, identification, optimization, control, synchronization.

Obsah

Se	Seznam použitých symbolů			
Se	Seznam použitých zkratek			
Se	znan	m obrázků		12
Se	znan	m tabulek		13
Ú	vod			14
1	Ana	nalýza současného stavu		15
	1.1	Princip funkce		15
	1.2	Pracovní cyklus		16
	1.3	Současné uspořádání mechanismu		17
2	Náł	ihrada pohonu mechatronickým uzlem		19
	2.1	Varianty generování lineárního pohybu		19
	2.2	Kinematika klikového mechanismu		21
		2.2.1 Kinematické schéma		21
		2.2.2 Citlivostní analýza		22
	2.3	Dynamická analýza		24
		2.3.1 Určení zátěžného momentu		24
		2.3.2 Návrh setrvačníku		25
		2.3.3 Momentové charakteristiky		26
	2.4	Výběr krokového motoru		27
	2.5	Popis použitého pohonu		28
		2.5.1 Budič ASD16D-C		28
		2.5.2 Krokový motor ASM69ACE		30
3	Říd	dicí jednotka pohonu		32
	3.1	Návrh HW		32
		3.1.1 Volba HW prostředků		32

		3.1.2	Blokové schéma	33
		3.1.3	Odměřování polohy	34
		3.1.4	Popis zapojení	36
	3.2	Návrh	۱ FW	39
		3.2.1	Příkazy pro zadání průběhů	40
		3.2.2	Algoritmus generování průběhů	41
		3.2.3	Synchronizace pohonů	43
		3.2.4	Odměřování referenční polohy	43
4	Náv	vrh me	etody řízení	45
	4.1	Požad	avky a omezení	45
	4.2	Metod	la řízení a identifikace	46
		4.2.1	Dopředné řízení bez zpětné vazby	46
		4.2.2	Struktura modelu	47
		4.2.3	Identifikace	47
		4.2.4	Návrh kompenzačního filtru	48
	4.3	Výpoč	íty budicích průběhů	49
		4.3.1	Optimalizace	49
		4.3.2	Generování tabulek pro MCU	54
5	Výs	ledky	v reálném provozu	56
	5.1	Model	l se setrvačníkem	56
		5.1.1	Zkušební přípravek	56
		5.1.2	Dosažené výsledky	57
	5.2	Model	l šicího stroje	58
		5.2.1	Popis funkčního modelu	58
		5.2.2	Dosažené výsledky	59
	5.3	Cenov	é porovnání variant	61
Zź	ivěr			62
Li	terat	ura		64
Se	znar	n přílo	h diplomové práce	67
50	Zinan.	n prino		01

Seznam použitých symbolů

e	[m]	excentricita klikového mechanismu
e(t)	[°]	průběh polohové odchylky
f	[Hz]	frekvence
f_s	[Hz]	vzorkovací frekvence
$F_{FIL}(s)$		obrazový přenos kompenzačního filtru
$F_{KM}(s)$		obrazový přenos modelu soustavy
J_m	$[kg \cdot m^2]$	moment setrvačnosti rotoru motoru
J_s	$[kg \cdot m^2]$	moment setrvačnosti setrvačníku
k	[°/°]	statické zesílení
l	[m]	délka ojnice
M	[Nm]	moment
n	[ot/min]	otáčky kliky
N	[pls/ot]	rozlišení mikrokrokování budiče motoru
r	[m]	délka ramene kliky
T	$[\mathbf{s}]$	násobná časová konstanta
u(t)	[°]	budicí průběh
v	[m/s]	rychlost jehelní tyče
w(t)	[°]	průběh žádané polohy
$w_{OPT}(t)$	[°]	průběh optimalizované žádané polohy
x	[m]	absolutní zdvih jehelní tyče
Δx	[m]	relativní zdvih jehelní tyče
y(t)	[°]	měřený průběh reálné polohy
$y_M(t)$	[°]	simulovaný průběh polohy
ϵ	$[rad/s^2]$	úhlové zrychlení kliky
φ	[°]	absolutní úhel natočení kliky
$\Delta \varphi$	[°]	relativní úhel natočení kliky
μ	$[m/^{\circ}]$	převod klikového mechanismu
au	$[\mathbf{s}]$	časová konstanta pólu filtru
ω	[rad/s]	úhlová rychlost kliky
ξ	[°]	poměrné tlumení

Seznam použitých zkratek

CAD	počítačový návrh
CCW	counterclokwise - otáčení proti směru hodinových ručiček
CW	clockwise - otáčení ve směru hodinových ručiček
FPGA	programovatelné hradlové pole
\mathbf{FW}	firmware
HW	hardware
IRC	inkrementální rotační snímač
JT	jehelní tyč
MCU	mikrokontrolér
SW	software

Seznam obrázků

1.1	Princip šití s plovoucí jehlou	15
1.2	Pracovní cyklus mechanismu	16
1.3	Model stávajícího mechanismu, převzato z $[1]$	18
2.1	Model klikového mechanismu, převzato z [2]	20
2.2	Kinematické schéma klikového mechanismu	21
2.3	Závislost zdvihu JT na natočení kliky	22
2.4	Citlivostní analýza	23
2.5	Průběhy dynamického momentu	24
2.6	Průběhy úhlového zrychlení, otáček a úhlu natočení kliky $\ \ldots\ \ldots\ \ldots$	25
2.7	Momentové charakteristiky zátěže	26
2.8	Momentová charakteristika motoru	31
3.1	Blokové schéma řídicí jednotky	33
3.2	Fyzické provedení řídicí jednotky	39
3.3	Rozdělení paměti programu	41
3.4	Obsluha přerušení časovače	42
4.1	Odezva pohonu bez řízení (zatíženo setrvačníkem)	46
4.2	Blokové schéma dopředného řízení	47
4.3	Princip parametrické identifikace	48
4.4	Frekvenční přenosy identifikovaných modelů	49
4.5	Vliv filtru ve frekvenční oblasti (ideální případ, rychlost $8)$	50
4.6	Postup optimalizace budicího průběhu	50
4.7	Optimalizace úseku T1	52
4.8	Optimalizace úseků T2 a T3	53
4.9	Algoritmus generování výstupních souborů	55
5.1	Model a fotografie zkušebního přípravku	56
5.2	Naměřená odezva na modelu se setrvačníkem (rychlost 8) $\ \ldots \ \ldots \ \ldots$	57
5.3	CAD model šicího stroje, převzato z [2] $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots$	59
5.4	Měřicí pracoviště	59
5.5	Naměřená odezva s klikovým mechanismem (rychlost 8) $\ldots \ldots \ldots \ldots$	60

Seznam tabulek

1.1	Pracovní cyklus	17
2.1	Úhly přechodů dle obr. 1.2	22
3.1	Kódování příkazů pro zadání průběhů	40
4.1	Výsledky identifikace pro různé rychlosti	48
5.1	Amplitudy překmitů na modelu se setrvačníkem	58
5.2	Amplitudy překmitů na modelu šicího stroje	60
5.3	Stanovení poměru cena/výkon	61

Úvod

U mnoha technických problémů bývá pouze otázkou času, kdy se podaří nalézt použitelné řešení. Pro nasazení v praxi je však podstatná i jeho cena, která nemusí vždy odpovídat přínosu. To se týká i oboru řízených pohonů, kterým se částečně zabývá tato diplomová práce. Elektronicky řízené pohony umožňují další rozvoj strojů tím, že pro generování požadovaných zdvihových funkcí jejich mechanismů není nutné používat mechanické převody (vačky), ale řadu průběhů lze pomocí řízeného pohonu vytvořit přímo, což je princip systémů označovaných termínem elektronická vačka. Náhradou klasických pohonů mechatronickými uzly s řízenými pohony lze významně zlepšit technické parametry strojů, ovšem totéž nemusí platit o poměru cena/výkon. Proto se vždy hledá kompromis mezi užitnými vlastnostmi a cenou, přičemž nezřídka při rozhodování vítězí právě cena.

Popsaný přístup byl i podnětem pro vznik této práce, která se zabývá možností využití krokového motoru jako cenové alternativy synchronního servomotoru v aplikaci inovace pohonu mechanismu jehelních tyčí průmyslového šicího stroje. Servomotory mají všechny předpoklady pro úspěšné použití v této aplikaci, kromě ceny. Ta je poměrně vysoká a pro použití v textilním průmyslu je výrazně limitujícím faktorem. Ceny špičkových krokových motorů jsou řádově o polovinu nižší, než ceny servomotorů s odpovídajícím řízením a tudíž má smysl se touto variantou pohonu zabývat, i když nelze očekávat dosažení kvalitativně stejně dobrých výsledků, jako se servomotory.

Protože se jedná o dynamicky poměrně náročnou aplikaci, pro kterou není použití krokového motoru typické, je hlavním cílem práce ověření jeho použitelnosti a nalezení provozních limitů, aby nakonec mohl být stanoven rozhodující poměr cena/výkon. Jelikož krokové motory nalézají v průmyslu uplatnění spíše v méně náročných mechanismech, jako jsou manipulátory, pásové dopravníky apod., omezují se schopnosti na trhu dostupných řídicích jednotek na generování průběhů s konstantním zrychlením, což neumožňuje definovat obecnou zdvihovou závislost. Těžištěm práce tak bude návrh vlastní experimentální řídicí jednotky, která bude schopna požadované zdvihové závislosti realizovat, vhodné metody řízení a nezbytného programového vybavení.

Kapitola 1

Analýza současného stavu

1.1 Princip funkce

Poháněným mechanismem je dvojice jehelních tyčí (dále jen JT) průmyslového šicího stroje, pracujícího na principu plovoucí jehly. Tento způsob šití je charakteristický tím, že jehla, táhnoucí nit, není pevně spojena s jednou pohyblivou částí stroje, jako u klasických šicích strojů, nýbrž prostupuje celá šitým materiálem a po jeho posunutí o délku stehu opět celá prostupuje zpět. Tento postup odpovídá ručnímu šití klasickou jehlou a používá se zejména na tvorbu ozdobných stehů. Podrobnější popis je uveden v diplomové práci [1], která se zabývá analýzou a optimalizací původního mechanismu pohonu JT.



Obrázek 1.1: Princip šití s plovoucí jehlou

Principielně je metoda plovoucí jehly zachycena na obrázku 1.1. Konstrukčně je průchod celé jehly (1) šitým materiálem (2) řešen tak, že jehla je symetrická, očko pro nit je uprostřed a za volné konce je předávána mezi dvojicí pohyblivých JT (3, 4), které v sobě nesou kleštinový mechanismus, jež zajišťuje vlastní uchopování jehly a je ovládán

táhlem, které vystupuje ze zadního konce JT. Zobrazená situace znázorňuje předání jehly od horní tyče spodní tyči, přičemž při opačném předání je situace analogická. K vlastnímu předání jehly dochází ve střední poloze, kdy obě tyče na okamžik stojí.

1.2 Pracovní cyklus

Na obrázku 1.2 je zachycena jedna perioda pracovního cyklu obou jehelních tyčí, během níž dojde ke dvěma předáním jehly. Horní tyč a s ní související veličiny budou dále označovány písmenem A, spodní tyč bude mít označení B. Perioda je zobrazena pro celkovou délku 240 ms, která odpovídá rychlosti 250 cyklů/min, což je požadovaná pracovní rychlost inovovaného stroje¹. Zdvihové funkce pro přechody mezi výdržemi nejsou předepsány, podstatný je pouze čas dosažení výdrží a to pokud možno bez nežádoucích překmitů. V obrázku 1.2 jsou přechody sestaveny jako části funkce sinus.



Obrázek 1.2: Pracovní cyklus mechanismu

 $^{^1{\}rm V}$ současném uspořádání je šicí stroj provozován na maximální rychlost 180 cyklů/min, inovovaná varianta se servomotory dosahuje rychlosti až 300 cyklů/min

Cyklus každé JT je složen z šesti úseků, zdvihů T1, T2, T3 a prodlev P1, P2, P3. Přechody jsou pro obě JT stejně dlouhé, liší se pouze jejich pořadí, zatímco prodlevy se pochopitelně svou délkou liší. Důležitým parametrem je čas pro předání jehly TG, který by měl být co nejkratší. Překmit mezi zdvihy T2 a T3 slouží k navolnění příze, aby mohla být vytvořena klička na jehlou protažené části niti. Za tuto kličku je posléze nit zachycena dalším mechanismem stroje a je protažena na stranu jehly v celé délce. Podrobněji je pracovní cyklus shrnut v tabulce 1.1.

	jehelní tyč A (horní)			jehelní tyč B (spodní)		
krok	úsek	čas [ms]	akce	úsek	čas [ms]	akce
1	P1A	25	posun látky	D1B	50	čekéní na jehlu
2	T1	25	jehla dolů	PIB	32	cekani na jeniu
	-		předání jehly	$A \rightarrow B$		
3				T2	30	šití
4	D91	199	čekání na jehlu	T3	11	povolení nitě
5	1 2 A	122	cekam na jemu	P2B	52	posun látky
6				T1	25	jehla nahoru
předání jehly $B \to A$						
7	Τ2	30	šití			
8	T3	11	povolení nitě	P3B	70	čekání na jehlu
9	P3A	27	posun látky			

Tabulka 1.1: Pracovní cyklus

1.3 Současné uspořádání mechanismu

Stávající pohon JT je řešen centrálním asynchronním elektromotorem, jehož otáčky lze řídit frekvenčním měničem. Tento motor pohání radiální vačku, která ovládá současně obě JT. Profil vačky určuje zdvihové závislosti a mechanicky zajišťuje vzájemnou synchronizaci JT.

Výhodou vačkového mechanismu je jeho jednoduchost a robustnost, což je dáno tím, že tento princip je používán již od doby, kdy byla metoda šití s plovoucí jehlou patentována (30. léta). Podstatné je, že údržba a seřízení nevyžaduje příliš kvalifikovanou obsluhu, jelikož klíčové mechanické součásti vyžadují kvůli opotřebení poměrně častou výměnu. Mírný nárůst vůlí vlivem opotřebení nemá sice zásadní vliv na přesnost stroje, výrazně se tím však zvyšuje jeho hlučnost. Nutnost dodržování hygienických limitů na pracovišti potom vede na snižování rychlosti stroje, což má samozřejmě nežádoucí vliv na produktivitu výroby.

Na obrázku 1.3 je uveden model vačkového mechanismu pohonu JT. Z něho je zřejmé, že přestože je třeba pohybovat pouze jehlou, která sama váží několik gramů, samotné hnací mechanismy jsou vůči jehle mnohonásobně rozměrnější a těžší, což je jednou z překážek pro zvýšování výkonu stroje. Pro provoz na vyšších rychlostech by součásti mechanismu musely být dimenzovány na větší dynamická zatížení, čímž by jejich hmotnosti a momenty setrvačnosti ještě více narostly a tím by se neúměrně zvýšily nároky na výkon pohonu.

Hmotnosti převodů by bylo možné redukovat snižením vzdálenosti mezi pohonem a jehelní tyčí, tato vzdálenost je však dána potřebnou délkou ramene šicího stroje. Pro šicí stroje s pevnou jehlou připadá v úvahu umístění pohonu přímo do ramene, což je u strojů s plovoucí jehlou podmíněno schopností přesné synchronizace dvojice pohonů. Ta se objevila až s příchodem elektronicky řízených servopohonů a vzhledem k jejich ceně byla pro nasazení v textilním průmyslu dlouhou dobu nezajímavá.



Obrázek 1.3: Model stávajícího mechanismu, převzato z [1]

Kapitola 2

Náhrada pohonu mechatronickým uzlem

2.1 Varianty generování lineárního pohybu

Jak již bylo naznačeno, nemá současná konstrukce pohonu potenciál pro další zvyšování výkonu stroje při zachování přípustné hlučnosti, tudíž bylo nutné celou konstrukci přepracovat s využitím moderních prostředků elektrických pohonů. Existují v podstatě dva způsoby, jakými lze generovat vratný lineární pohyb JT:

- Lineární motor, který nevyžaduje další převody, ale má nevýhodný poměr vlastní hmotnosti vůči hmotnosti poháněné JT, tudíž by jeho provoz byl energeticky zbytečně náročný. Vysoká cena také není příznivá.
- 2. Rotační motor s mechanickým převodem na lineární pohyb, což je sice v podstatě totéž, jako je stávající řešení s vačkou, zde by se ovšem jednalo o dvojici řízených pohonů se servomotorem nebo krokovým motorem pro každou JT zvlášť. To umožní umístit pohon do bezprostřední blízkosti JT, čímž se výrazně redukuje hmota převodů. Cena je dána především zvolenou variantou motoru.

Při volbě nové konstrukce byla dána přednost druhé variantě, která dává větší prostor k experimentování s různými druhy a typy rotačních motorů, jelikož při případné výměně stačí upravit montážní přírubu, zbytek konstrukce není třeba měnit. To umožní vyrábět více variant šicího stroje podle toho, zda bude preferován výkon nebo cena, přičemž jediným rozdílem bude osazený pohon a jeho řízení.

Převod rotačního pohybu na vratný lineární pohyb lze opět zajistit několika způsoby. Pokud pomineme vačkový mechanismus, který je snaha odstranit, nabízí se dvě použitelné varianty:

1. Klikový mechanismus, kdy ke křižáku, umístěnému excentricky vůči ose kliky, je připevněna JT. Potřebný zdvih je generován pouze pootáčením kliky vůči poloze,

v níž je klika kolmá k rovině pohybu křižáku, resp. ose jehelní tyče. Nevýhodou tohoto řešení je nekonstantní převod, který může způsobit určité obtíže při řízení pohonu, i když v úvratích vlivem proměnného převodu dochází k redukci momentu setrvačnosti zátěže, což je jev příznivý. Výhodami je naopak tuhost převodu a malý zástavný prostor.

2. Řemínkový převod, kdy řemínek, napnutý mezi dvojicí řemeniček, z nichž jedna je hnaná, unáší JT. Výhodou je konstantní převod, což usnadňuje řízení pohonu, protože nedochází ke kolísání redukovaného momentu setrvačnosti zátěže, a také nižší tuhost řemínku, která má příznivý účinek na potlačování rázů a tím na snížení hlučnosti. Na druhou stranu může poddajnost řemínku způsobovat kmity v úvratích a tím zhoršovat přesnost. Praktickým omezením použitelnosti této varianty je fakt, že řemínkový převod zaujímá větší zástavný prostor a nehodí se do zavedené konstrukce šicího stroje.

Na pracovišti KTS FS TUL byla v rámci výzkumu [2] ověřena funkce obou variant převodu, přičemž ze strany zadavatele byla dána přednost převodu klikovým mechanismem a to zejména z důvodu úspory zástavného prostoru vůči řemínkovému převodu. Model navrženého klikového mechanismu je uveden na obrázku 2.1.



Obrázek 2.1: Model klikového mechanismu, převzato z [2]

2.2 Kinematika klikového mechanismu

2.2.1 Kinematické schéma

Návrh rozměrů součástí klikového mechanismu není předmětem této práce. Byl proveden již dříve na pracovišti KTS FS TUL v rámci zakázkového výzkumu, což je důvod, proč zde nemohou být uvedeny konkrétní rozměry součástí. Ty vychází ze současného stavu inovace mechanismu, kdy je za stěžejní pohon zvolen synchronní servomotor. Klikový mechanismus je nyní optimalizován pro co nejlepší přizpůsobení zátěže momentovým charakteristikám zvoleného typu synchronního servomotoru, nelze tedy očekávat, že výsledky dosažené s krokovým motorem budou optimální. Přesto by měly poskytnout základní informaci o použitelnosti krokového motoru, přičemž dalšího případného zlepšení by bylo možné dosáhnout optimalizací klikového mechanismu na míru použitému typu motoru. Kinematické schéma je na obrázku 2.2.



Obrázek 2.2: Kinematické schéma klikového mechanismu

Význam označených veličin je následující:

- x lineární zdvih křižáku (jehelní tyče)
- φ úhel natočení kliky
- $\bullet \ e {\rm excentricita}$ klikového mechanismu
- *l* délka ojnice
- r délka kliky

Pro přímou kinematiku, tj. závislost zdvihu křižáku x na natočení kliky φ platí vztah:

$$x = r\cos(\varphi) + l\cos\left(\arcsin\left(\frac{e - r\sin(\varphi)}{l}\right)\right),\tag{2.1}$$

Inverzní kinematiku, tj. závislost úhlu natočení φ na zdvihu x, popisuje vztah:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{e}{x}\right) + \arccos\left(\frac{e^2 + x^2 + r^2 + l^2}{2r\sqrt{x^2 + e^2}}\right).$$
(2.2)



Obrázek 2.3: Závislost zdvihu JT na natočení kliky

Závislost zdvihu JT na úhlu natočení kliky je pro konkrétní rozměry mechanismu a interval úhlu $\varphi = \langle 0, 180^{\circ} \rangle$ vypočítána na obrázku 2.3.

S využitím rovnice 2.2 a známých rozměrů součástí stroje lze vypočítat úhlová natočení φ potřebná k realizaci požadovaných zdvihů JT. V tabulce 2.1 jsou uvedeny konkrétní vypočtené hodnoty pro označení přechodů z obrázku 1.2. Úhel φ_0 označuje počáteční polohu kliky, úhel φ_1 koncovou polohu a úhel $\Delta \varphi$ jejich rozdíl. Úhly jsou měřeny od roviny rovnoběžné s JT směrem ke klice, tj. proti směru hodinových ručiček na obrázku 2.2. Jelikož je stroj navržen symetricky vůči ose ležící v rovině šitého materiálu, jsou tyto hodnoty shodné pro pohony obou JT.

abulka 2.1. Olity precibuu die obi. 1.					
přechod	φ_0 [°]	$\Delta \varphi$ [°]	φ_1 [°]		
T1	134,1	-85,6	48,50		
T2	48,5	99,22	147,72		
T3	147,72	-13,62	134,1		

Tabulka 2.1: Úhly přechodů dle obr. 1.2

2.2.2 Citlivostní analýza

Jedním ze sledovaných parametrů je přesnost mechanismu při dosažení výdrže na konci zdvihů T1 (viz obr. 1.2). V těchto místech dochází k vlastnímu předání jehly mezi jehelními tyčemi, tudíž je nutno dosáhnout požadované polohy s definovanou tolerancí Δx . Její hodnota byla na základě zkušeností z dosavadního provozu stanovena na $\Delta x = 0,2$ mm.

Jelikož odměřování polohy bude realizováno pouze snímačem natočení úhlu kliky φ (hřídele motoru) a nikoli přímo lineárního zdvihu x JT, je nutné stanovit dovolenou hodnotu úhlových překmitů $\Delta \varphi$, při které ještě bude splněna tolerance Δx . K tomu je třeba znát převod mechanismu μ , který je závislý na absolutním úhlu natočení φ . Převod μ klikového mechanismu¹ získáme derivací rovnice 2.1 podle φ :

$$\mu = \frac{dx}{d\varphi} = -r\sin\varphi + \frac{(e - r\sin\varphi)r\cos\varphi}{l\sqrt{1 - \frac{(e - r\sin\varphi))^2}{l^2}}}$$
(2.3)

Výsledný vztah má tvar:

$$\Delta x = \mu \, \Delta \varphi. \tag{2.4}$$

Pro dané rozměry mechanismu lze převod interpretovat sítí charakteristik na obrázku 2.4, kde je zachycen průběh funkce 2.4 pro hodnoty $\Delta \varphi$ od 0,1 do 1° s krokem 0,1°. Z grafu lze odečíst, že pro splnění požadované přesnosti zdvihu 0,2 mm při výdrži v úhlu $\varphi = 48,5^{\circ}$ činí dovolený překmit úhlu $\Delta \varphi \approx 0,7^{\circ}$. Tato hodnota bude jedním z hodnotících kritérií dosažené kvality řízení.



Obrázek 2.4: Citlivostní analýza

 $^{^1\}mathrm{Pro}$ zjednodušení je uvažován ideální mechanismus, tj. bez vyšetřování geometrické přesnosti

2.3 Dynamická analýza

2.3.1 Určení zátěžného momentu

Pro správný výběr krokového motoru je nutné nejprve určit momentovou charakteristiku zátěže, což je v tomto případě jehelní tyč ovládaná klikovým mechanismem. Analytický výpočet dynamického zátěžného momentu motoru je vlivem nekonstantního převodu poměrně složitý. Jelikož byl ale celý klikový mechanismus na pracovišti KTS FS TUL navrhován a modelován v prostředí Pro/ENGINEER, bylo možné provést tento výpočet numericky. Výpočet byl proveden pro rozsah úhlu φ odpovídající zdvihu T1, viz tabulka 2.1, přičemž byl použit budicí průběh úhlového zrychlení, který byl navržen pro variantu s pohony servomotory. Začátek a konec sinusového průběhu je doplněn o taktéž sinusové náběhy s cílem minimalizovat rázy, které by byly generovány skokem ve zrychlení v případě čistě sinusového průběhu.

Jelikož zrychlení nabývá nejvyšší hodnoty při zdvihu T1, bude momentová charakteristika sestavena pro tento zdvih. Konkrétní průběhy úhlového zrychlení, rychlosti a úhlu natočení kliky jsou uvedeny na obrázku 2.6. Jednotka úhlové rychlosti je pro větší přehlednost přepočítána na [ot/min]. Popsanému buzení odpovídá dle simulace v programu Pro/ENGINEER průběh zátěžného momentu na obrázku 2.5. Ve společném grafu je uveden i průběh momentu náhradního setrvačníku, o němž bude pojednáno dále.



Obrázek 2.5: Průběhy dynamického momentu



Obrázek 2.6: Průběhy úhlového zrychlení, otáček a úhlu natočení kliky

2.3.2 Návrh setrvačníku

V první fázi zkoušek pohonů se synchronním servomotorem na KTS FS TUL bylo dynamické zatížení pro jednoduchost simulováno setrvačníkem, který byl navržen tak, aby jeho moment setrvačnosti $J_s=1,1\cdot10^{-4}$ kg·m² odpovídal redukovanému momentu klikového mechanismu na konci zdvihu, nikoli jeho maximální hodnotě dosažené přibližně uprostřed zdvihu. Takto volená hodnota dává vypovídající výsledky o chování na začátku a konci zdvihu, i když dynamické zatížení ve střední části bude vůči reálnému provozu přibližně poloviční.

Stejný setrvačník bude použit i pro zkoušky se zvoleným krokovým motorem. Zde by měla být situace o něco příznivější v tom smyslu, že krokové motory mají ve srovnání se synchronními servomotory nižší poměr hnacího momentu vůči vlastnímu momentu setrvačnosti, tudíž relativní změna celkového momentu setrvačnosti zátěže a motoru bude nižší.

2.3.3 Momentové charakteristiky

Uvedené průběhy momentů vykreslené v závislosti na otáčkách vytvoří momentové charakteristiky zátěže, které jsou uvedené na obrázku 2.7, opět jak pro klikový mechanismus tak i pro navržený náhradní setrvačník.



Obrázek 2.7: Momentové charakteristiky zátěže

2.4 Výběr krokového motoru

Krokové motory jsou v průmyslu nasazovány zejména v dynamicky méně náročných aplikacích, jako jsou pohony pásových dopravníků automatizovaných výrobních linek, lineárních aktuátorů² apod. Významnou předností krokových motorů je jejich schopnost pracovat bez polohové zpětné vazby, což šetří náklady na odměřování polohy i vyhodno-covací řídicí systém. Prakticky se používají pouze koncové spínače pro určení referenční a koncové polohy poháněného mechanismu.

Předpokladem pro spolehlivý provoz je dodržení maximálního zátěžného momentu motoru, neboť při jeho překročení dochází ke ztrátě kroku (nebo více kroků), kterou bez zpětné vazby nelze jednoduše detekovat. Z tohoto důvodu řada výrobců nabízí varianty motorů s vestavěným enkodérem polohy, kterým je typicky optoelektronický IRC snímač s rozlišením řádově stovek pulzů na otáčku, jehož výstupní signál se zpravidla zpracovává v řídicím PLC. Pomocí této zpětné vazby lze detekovat ztrátu kroku během chodu motoru, případně kontrolovat koncovou polohu. Způsob ošetření případných odchylek je ponechán na uživateli, resp. programátorovi PLC.

Posledním vývojovým stupněm je zavedení polohové zpětné vazby přímo do budiče krokového motoru, který tak může ztrátu kroku automaticky eliminovat. Takové provedení sice zvyšuje cenu budiče, umožňuje však použít krokový motor i pro dynamicky náročnější aplikace. Pro účely této práce byl na pracovišti KTS FS TUL vybrán pohon s krokovým motorem právě v tomto uspořádání.

Klíčovými parametry krokového motoru jsou jeho momentová charakteristika a moment setrvačnosti rotoru, který se spolu s momentem setrvačnosti zátěže (klikového mechanismu) bude podílet na celkovém dynamickém zátěžném momentu. Při hledání vhodného typu motoru je nutné pro katalogovou hodnotu momentu setrvačnosti a zvolený průběh zrychlení vypočítat příslušný průběh dynamického momentu a tento průběh přičíst k průběhu dynamického momentu samotné zátěže. Z výsledku se získá celková momentová charakteristika, podle níž lze porovnávat použitelnost vybraného typu motoru. Praktickým problémem při výběru motoru je fakt, že poměr dosahovaného hnacího momentu a momentu setrvačnosti rotoru pro rostoucí rozměry (a tedy i výkon) motoru spíše klesá, tudíž nelze motor jednoduše zvolit jako výrazně předimenzovaný. V tom případě by byl poměr momentu setrvačnosti motoru výrazně vyšší, než moment setrvačnosti zátěže, což by vedlo na vyšší spotřebu energie a tedy i na vyšší provozní náklady, nehledě na větší rozměry a vyšší pořizovací cenu výkonnějšího motoru a budiče.

 $^{^2\}mathrm{S}$ převodem rotačního pohybu na posuvný pomocí šroubu a matice

2.5 Popis použitého pohonu

Zvolená sestava krokového motoru ASM69ACE a jemu příslušného budiče ASD16D-C z řady α step je výrobkem fy. Oriental Motor U.S.A. Úplný popis je dostupný v dokumentaci výrobce [3] a manuálu [4]. Podstatnou vlastností řady pohonů α step je implementace polohové zpětné vazby, jak byla popsána výše.

2.5.1 Budič ASD16D-C

Základní vlastnosti:

- polohová zpětná vazba
- mikrokrokování (lze nastavit 500, 1000, 5000, 10 000 mikrokroků na otáčku)
- řízení pulzním signálem
- rychlostní filtr
- nastavitelný proud vinutím
- napájení 230V/50Hz

Budič sdružuje funkce výkonového členu, proudové ochrany proti přetížení motoru a především řízení pomocí vnějších signálů z nadřazené řídicí jednotky. Pro každý řídicí puls, resp. požadovaný krok, je generována budicí sekvence vinutí motoru. Kromě řídících vstupů je budič vybaven řadou pomocných vstupů a výstupů, které poskytují informace např. o ukončení pohybu, přetížení apod. Všechny vstupy a výstupy jsou galvanicky odděleny pomocí optočlenů, výstupy jsou v provedení diferenciálního budiče linky nebo tranzistorového spínače s otevřeným kolektorem. Napájení galvanicky oddělené části je externí, lze volit mezi 5 a 24 V.

Činnost polohové zpětné vazby se principiálně výrazně liší od funkce klasické kaskádní regulace známé u servopohonů. Zpětná vazba je aktivována až tehdy, pokud polohová odchylka dosáhne velikosti jednoho mechanického kroku (1,8°), nezávisle na nastavení rozlišení mikrokrokování. Potom je moment motoru udržován řídicí elektronikou budiče na maximální hodnotě tak, aby se po odeznění zátěže, která polohovou odchylku způsobila, rotor ustálil v požadované poloze, čímž je zabráněno ztrátě kroku. Maximální velikost polohové odchylky přitom není nijak omezena. Je ovšem omezena doba trvání chodu v uzavřené smyčce a to na 5 s. Pokud během této doby nedojde k vyrovnání polohové odchylky pod 1,8°, budič motor zastaví a prostřednictvím signálu ALARM oznámí chybu. Z uvedeného vyplývá, že tato zpětná vazba má spíše kontrolní charakter, i když dokáže zabránit ztrátě kroku při krátkodobém přetížení.

V části 2.2.2 bylo ukázáno, že v aplikaci pohonu jehelní tyče je třeba řídit polohu s maximální odchylkou 0.7° , tudíž v oblasti, kde se popsaná zpětná vazba neuplatní.

K systému je tak nutno přistupovat, jako by pracoval v otevřené smyčce. Z toho vychází navržená metoda řízení popsaná v části 4.2.

Další podstatnou vlastností použitého budiče je schopnost mikrokrokování s rozlišením až 10 000 kroků/ot, tzn. každý z 200 mechanických kroků motoru je interpolován až na 50 mikrokroků. Přechodová odezva krokového motoru při vykonání kroku vykazuje výrazné rezonanční překmity, což je obecná vlastnost všech krokových motorů, která je dána jejich konstrukcí a způsobem buzení. Rezonance se projevuje zejména při nízkých otáčkách, kdy mezi sousedními kroky proběhne několik period kmitů. U krokových motorů se definují tzv. rezonanční otáčky³, nad kterými tento jev již nenastává. V uvažované aplikaci je však vyžadován spojitý průběh rychlosti již od nuly, tudíž se při rozběhu a brzdění rezonančním otáčkám vyhnout nelze.

Při experimentech s navrženým setrvačníkem bylo zjištěno, že amplituda překmitů řádově dosahuje velikosti kroku. U použitého motoru s rozlišením 200 kroků/ot (1,8°/krok) by tak bez mikrokrokování samotné překmity způsobené jeho chodem přesahovaly dovolenou toleranci 0,7°. To by vadilo právě na konci zdvihu, kde je vyžadována aperiodická odezva. Proto bylo využito mikrokrokování s nejvyšším rozlišením 10 000 kroků/ot, kdy velikost kroku činí pouze 0,036°. To umožní nahlížet na motor jako na spojitý v poloze, i když tím vzrostou nároky na navrhovanou řídicí jednotku, zejména na maximální frekvenci řídících pulzů. Snížením velikosti kroku se dále výrazně snižují hluk a vibrace, což je i důvod, proč renomovaní výrobci nabízejí špičkové pohony s pětifázovými krokovými motory a budiči s rozlišením až 50 000 kroků na otáčku.

Informace z indukčnostního polohového snímače integrovaného v motoru je přístupná prostřednictvím kvadraturního signálu (emulace výstupu IRC snímače), jehož rozlišení je shodné s nastaveným rozlišením budiče. Výrobce uvádí, že tento signál může být zpožděn až o 1 ms vůči aktuální poloze, což bylo ověřeno měřením. Navíc bylo zjištěno, že při kódování směru pohybu dochází k neočekávaným chybám, které zřejmě generuje interpolátor v budiči. Pravděpodobně jsou způsobeny požadovaným průběhem polohy, který nutí motor pracovat v režimu, na který není navržen, protože reverzace směru otáčení motoru musí mezi zdvihy T2 a T3 proběhnout v podstatě za chodu⁴. Z tohoto důvodu bylo měření polohy realizováno externím IRC snímačem, popsaným v části 3.1.3.

Budič dále disponuje funkcí rychlostního filtru (VFIL), který je doporučován pro "zaoblení" hran průběhů rychlosti, jež jsou zpravidla zadávány jako rampové úseky. Parametrem filtru je časová konstanta, kterou lze nastavit v 16-ti krocích (0–82 ms). V dané aplikaci měla činnost tohoto filtru spíše negativní vliv a nejlepších výsledků bylo dosaženo po jeho úplném vypnutí.

 $^{^3 \}rm Pouze$ pro samotný motor bez zátěže, jelikož provozní rezonanční frekvence závisí také na momentu setrvačnosti zátěže.

 $^{^4{\}rm V}$ manuálu [4] není čas potřebný pro změnu směru otáčení přesně specifikován, výrobce se omezil pouze na formulaci: "Ne kratší, než je nezbytně nutné"

Posledním nastavitelným parametrem budiče je proudové omezení (CURRENT), které lze použít pro snížení tepelného zatížení motoru. V dané aplikaci byla nastavena maximální hodnota proudu pro dosažení co nejvyššího momentu.

2.5.2 Krokový motor ASM69ACE

Základní vlastnosti:

- konstrukce: hybridní, dvoufázový
- statický vazební moment: 2 Nm
- moment setrvačnosti rotoru: $J_m = 0.802 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
- rozlišení: 200 kroků na otáčku (krok = $1,8^{\circ}$)
- vestavěný indukčnostní snímač natočení
- bipolární vinutí (buzení dvojicí H můstků)

Podrobné elektrické parametry motoru (odpor a indukčnost fáze, doporučený proud) výrobce neuvádí, jelikož je motor s budičem dodáván jako celek. Nejpodstatnější parametry motoru pro návrh pohonu jsou vlastní moment setrvačnosti J_m a provozní momentová charakteristika uvedená na obrázku 2.8. Pro srovnání je uvedena spolu s momentovými charakteristikami klikového mechanismu a náhradního setrvačníku z obrázku 2.5, které jsou zde již uvažovány včetně dynamického momentu rotoru. Momentová charakteristika motoru závisí na způsobu jeho buzení, výrobce ji uvádí při použití dodaného budiče a rozlišení 1000 kroků na otáčku, přičemž ale neuvádí vliv jiného rozlišení na její tvar. Dále neuvádí ani charakteristiku rozběhovou, což vzhledem k požadovanému průběhu rychlosti nevadí, protože motor je z nulové rychlosti rozbíhán spojitě.

Jelikož je průběh momentu klikového mechanismu nesymetrický vůči ose otáček, je momentová charakteristika motoru zobrazena v 1. i 4. kvadrantu. Je vidět, že je využíván rozsah otáček, kde moment motoru ještě výrazně neklesá, přesto je pro zvolený průběh zrychlení (viz. obr. 2.6) maximální moment překročen. Z tohoto důvodu zřejmě nebude možné dosáhnout požadované rychlosti stroje 250 cyklů za minutu.



Obrázek 2.8: Momentová charakteristika motoru

Kapitola 3

Řídicí jednotka pohonu

3.1 Návrh HW

Jak již bylo zmíněno v úvodu práce, je návrh vlastní řídicí jednotky vynucen tím, že standardní řídicí jednotky, určené pro ovládání krokových motorů v úlohách průmyslové automatizace, umožňují generování pouze průběhů s konstantním zrychlením. To je pro realizaci požadované zdvihové funkce nedostačující. Navrhovaná řídicí jednotka musí zajišťovat následující funkce:

- Generování řídicích pulzů pro průběhy s obecným zrychlením
- Synchronizace dvou identických pohonů
- Změna rychlosti v několika krocích
- Odměřování referenční polohy pohonů

3.1.1 Volba HW prostředků

Návrh HW řídicí jednotky vychází z toho, že tato bude sloužit pouze pro experimentální ověření použitelnosti krokových motorů v dané aplikaci. Neklade si za cíl konstrukci řídicí elektroniky ve formě použitelné pro případnou sériovou výrobu, naopak je orientován spíše na využití dostupných vývojových prostředků.

Pro realizaci HW připadá v úvahu jednočipový mikrokontrolér (MCU) nebo hradlové pole (FPGA), přičemž každá z těchto variant má jisté výhody a nevýhody. Výhodou MCU jsou jednodušší vývojové prostředky, nedosahuje však výkonu FPGA, které má schopnost nezávislého paralelního chodu více částí obvodu. To umožňuje v jediném čipu implementovat funkce, které jediný MCU není schopen zvládnout. FPGA je tedy vhodné pro sériovou výrobu, je však náročnější na zvládnutí návrhových systémů. HW řídicí jednotky bude právě kvůli jednoduchosti návrhu postaven na bázi MCU, přičemž pro hromadnou výrobu by bylo vhodnější navržené algoritmy implementovat v hradlovém poli. Primární funkcí řídicí jednotky je periodické generování sekvence pulzů, která odpovídá požadované zdvihové funkci. Frekvence pulzů f [Hz] přitom odpovídá rychlosti otáčení motoru n [ot/min] podle vztahu:

$$f = \frac{N \cdot n}{60},\tag{3.1}$$

kde N [pls/ot] je nastavené rozlišení krokového motoru, resp. jeho budiče. Z grafů na obrázku 2.6 je patrné, že pro požadovaný průběh zdvihové funkce dosahuje rychlost otáčení nejvýše 1000 ot/min. Mikrokrokování je nastaveno na nejvyšší rozlišení použitého budiče, tj. N = 10~000 pls/ot. Dosazením do vztahu 3.1 dojdeme k maximální frekvenci pulzů, kterou musí být řídicí jednotka schopna generovat: $f_{max} = 167$ kHz, tj. nejkratší perioda činí $T_{min} = 6 \ \mu$ s. Během této doby musí mít procesor dostatek času na vykonání rutiny pro generování jednoho pulzu.

Zvoleným typem procesoru je PIC18F4685 fy. Microchip. Jeho maximální taktovací frekvence je 40 MHz, přičemž vykonání jedné instrukce trvá 4 periody hodinového signálu. Doba vykonání jedné instrukce tak činí 100 ns, tudíž lze mezi nejbližšími dvěma pulzy vykonat cca 60 instrukcí. To se při psaní obslužného programu ukázalo být jako dostatečné i s nezbytnou rezervou.



3.1.2 Blokové schéma

Obrázek 3.1: Blokové schéma řídicí jednotky

Blokové schéma řídicí jednotky je na obrázku 3.1. Každý z dvojice motorů (MOTOR A, MOTOR B) je napájen vlastním budičem (Budič A, Budič B), který je řízen příslušným MCU (SLAVE MCU A, SLAVE MCU B). Úkolem těchto MCU je generování sekvencí řídicích pulzů pro vykonání požadovaných zdvihových funkcí obou pohonů. V paměti MCU je uložen program pro generování pulzů i potřebná data. Program je u obou MCU stejný, data se liší podle naprogramovaných průběhů.

Činnost SLAVE MCU je synchronizována nadřazeným MASTER MCU, který zajišťuje ovládání řídicí jednotky jako celku. Řídicí jednotka se tedy skládá celkem ze tří MCU a dalších podpůrných obvodů, z nichž nejvýznamnější jsou dekodéry polohy (DECODER A, DECODER B), které zpracovávají signály z dvojice snímačů (IRC A, IRC B) a poskytují informaci o úhlu natočení motoru.

3.1.3 Odměřování polohy

Přestože navržené řízení pohonů pracuje v otevřené smyčce, je pro zaručení spolehlivé funkce stroje nutné ověřit skutečnou polohu JT ve stanoveném místě každé periody pracovního cyklu. Pokud by byla poloha JT mimo vymezené pásmo, znamená to chybu (např. zaseknutí) a nesmí být spuštěn další pracovní cyklus.

Jelikož se z důvodu nedostatku času nepodařilo uspokojivě vyřešit odměřování s využitím informace o poloze ze snímače integrovaného v krokovém motoru, je poloha každé JT měřena pomocí nezávislého snímače. Pro účely výzkumu to není na závadu, pro nasazení v sériové výrobě by se ovšem tento problém musel odstranit. Především kvůli ceně snímače, ale i z důvodu problematického umístění na stroji. I proto není snímán přímo zdvih jehelní tyče pomocí lineárního snímače polohy, ale pouze natočení hřídele motoru prostřednictvím IRC snímače.

Snímač polohy

Použitým typem snímače je LARM IRC305/5000KBD. Jedná se o snímač v průmyslovém provedení, určený primárně pro přesné odměřování na CNC strojích. Úplný popis je uveden v [5], základní vlastnosti snímače jsou:

- Rozlišení 5000 pls/ot (0,072°)
- Maximální otáčky 10 000 n/min, úhlové zrychlení 40 000 rad/s²
- Moment setrvačnosti rotujících částí 20 g $\cdot \rm{cm}^2$
- Napájení 5V/100mA, diferenciální logické výstupy RS422/485

Snímač je k hřídeli motoru připojen přes vlnovcovou homokinetickou spojku, která vy-rovnává nesouosost hřídelů.

Zpracování signálu

Signály z každého IRC snímače jsou zpracovávány speciálním číslicovým obvodem HCTL2032 fy. Avago Technologies (dříve Agilent), jehož popis je uveden v [6]. Obvod integruje následující funkce:

- Filtr logických signálů kombinace Schmittových KO a číslicového filtru
- Dekodér směru na principu stavového automatu, lze volit rozlišení $1\times, 2\times, 4\times$
- Obousměrný 32 bitový čítač pulzů
- Výstupní 32 bitový latch a multiplexer pro čtení dat po 8 bitové paralelní sběrnici

Obvod provádí synchronní vzorkování vstupních signálů frekvencí 20 MHz, která je odvozena od základní frekvence oscilátoru řídicí jednotky 40 MHz. Vzorkované hodnoty vstupují do číslicového filtru, který mění výstupní úroveň až po třech po sobě jdoucích shodných vstupních hodnotách. Tím se odstraní případný šum, způsobený např. zastavením IRC snímače na rozmezí pulzu.

Filtrované signály jsou dekódovány pomocí synchronního stavového automatu s nastavitelným rozlišením. Jelikož je rozlišení budiče motoru nastaveno na 10 000 kroků/ot a fyzické rozlišení použitého IRC snímače je pouze 5 000 pls/ot, je rozlišení dekodérů DE-CODER A, DECODER B nastaveno na dvojnásobné, tzn. že je generován puls pro čítač polohy při náběžné i sestupné hraně signálu A. Tak se získá jednotné rozlišení 10 000 pls/ot, což zjednoduší vyhodnocování polohové odchylky v MCU.

I když je obvod HCTL2032 navržen pro odměřování polohy ve dvou osách a tudíž by mohl jediný kus zpracovávat signály obou IRC snímačů, je použita dvojice těchto obvodů pro každý pohon zvlášť. Důvodem je výstupní sběrnice, která je společná oběma osám. Pokud by nastal požadavek na čtení dat od obou SLAVE MCU současně, musela by být stanovena priorita a oba pohony by tak přestaly být zcela nezávislé. S dvojicí obvodů toto nemůže nastat, naopak existuje možnost využít u každého obvodu druhou osu pro nezávislé sledování polohy druhého pohonu, případně polohy jiného mechanismu stroje, čímž by se v jiných aplikacích daly rozšířit způsoby vzájemné synchronizace pohonů.

Měřicí ústředna

Záznam skutečných průběhů natočení motorů je proveden měřicí ústřednou HBM MGCPlus, vybavenou kartami ML60B, které jsou určené pro zpracování signálů ze snímačů rotačních veličin, tj. otáček a kroutícího momentu. Podporovaným typem je mimo jiné i IRC snímač.

Při měření je použita maximální možná vzorkovací frekvence $f_s=19$ 200 Hz, rozlišení úhlu natočení je zvýšeno ze základního rozlišení snímače (5 000 pls/ot) na 20 000 pls/ot
nastavením měřicí karty do režimu dekódování směru při obou hranách signálů IRC čidla. Natočení je tedy měřeno s rozlišením 0,018°, což je polovina velikosti kroku motoru.

Ústředna se k počítači připojuje přes standardní rozhraní USB. Obslužný software HBM Setup Assistent slouží k nastavení kanálů, rozsahů měřicích karet a záznamu dat. V režimu osciloskopu lze v téměř reálném čase sledovat průběhy měřených veličin. Zaznamenávaná data lze pro další zpracování exportovat do ASCII souboru.

3.1.4 Popis zapojení

Schéma zapojení elektroniky řídicí jednotky je uvedeno v příloze D^1 Zapojení odpovídá blokovému schématu na obrázku 3.1. Funkce nejdůležitějších bloků byly popsány výše, zde bude uveden popis dalších pomocných obvodů a signálů použitých ke komunikaci bloků.

Rozhraní SLAVE MCU – budič

Pro ovládání budiče krokového motoru se používají tři logické signály:

- PLS náběžná hrana znamená požadavek na vykonání kroku, šířka pulzu musí být větší než 1 μs. Pulzy generované MCU mají konstantní šířku 1,4 μs, mění se pouze jejich rozestupy.
- DIR určuje směr vykonaného kroku, log. 1 = CW, log. 0 = CCW. Tento signál musí být stabilní v době náběžné hrany signálu PLS.
- C.OFF vypnutí napájení vinutí motoru, umožňuje ručně otočit motorem bez nutnosti celkového vypnutí. Tento signál slouží pouze pro seřizování a je vyveden na tlačítko.

Rozhraní IRC snímač – dekodér

Výstupy IRC snímače jsou v provedení diferenciálního budiče linky, napěťové úrovně odpovídají fyzické vrstvě rozhraní RS422/485. Pro převod do úrovní TTL/CMOS slouží obvod IC10. Výstupy snímače jsou standardní pravoúhlé signály fázově posunuté o 90°. Směr otáčení je kódován následovně:

- CW signál A předbíhá před B
- CCW signál A je zpožděn vůči B

¹Schéma je rozděleno na dva listy. První zobrazuje obvody MASTER MCU, druhý SLAVE MCU. Protože jsou části A i B SLAVE MCU elektricky shodné, je uvedeno pouze schéma části A. Schéma v elektronické podobě je na přiloženém CD.

Rozhraní dekodér – MCU

Mezi dekodérem (IC11) a SLAVE MCU (IC12) probíhá komunikace v obou směrech. Dekodéry bohužel nemají implementováno žádné ze standardních sériových rozhraní (I²C, SPI), tudíž komunikace probíhá celkem po dvanácti signálech, osmi datových a čtyř řídicích:

- D0–D7 8 bitová datová sběrnice, přístup k datům je asynchronní
- SEL1, SEL2 signály pro výběr byte, který se bude číst
- OE aktivace třístavového výstupu datové sběrnice
- RST nulování čítače polohy

Poloha je měřena absolutně od doby provedení resetu čítače. Čítač má šířku 32 bitů, tj. přes 4·10⁹ pulzů. Požadované natočení motoru se pohybuje v rámci čtvrtiny jedné otáčky při rozlišení 10 000 pls/ot, tudíž využitý rozsah čítače je cca 2500 (přibližně 12 bitů). Pohyb je navíc vratný, takže není třeba řešit přetečení čítače.

Rozhraní MASTER MCU – SLAVE MCU

Pro komunikaci mezi procesory jsou definovány tyto signály:

- RUN/HALT signál generovaný MASTER MCU, je společným vstupem obou SLAVE MCU. Náběžná hrana spustí vykonávání sekvence, sestupná způsobí okamžité pozastavení i během chodu pohonu. Tato vlastnost není v běžném provozu využívána, slouží pro budoucí implementaci okamžitého TOTAL STOPu celého stroje.
- SPEED 0–2 3-bitová informace v prostém binárním váhovém kódu o požadované rychlosti. Umožňuje uložit do paměti každého SLAVE MCU až na 8 nezávislých průběhů, mezi nimiž lze za chodu přepínat. V uvažované aplikaci slouží pro změnu rychlosti v osmi krocích.
- READY A, READY B výstupní signály SLAVE MCU oznamují stav, kdy SLAVE MCU čeká na nové spuštění. To je po provedení inicializace po zapnutí, nebo po úspěšném dokončení předchozí spuštěné sekvence pulzů.

Oscilátor

Kromě popsaných bloků obsahuje zapojení ještě centrální krystalový oscilátor, který generuje jednotný hodinový signál pro všechny tři procesory. Důvodem je nutnost přesně dodržet shodné časování u obou SLAVE MCU. Ty sice mají integrovány vlastní obvody krystalového oscilátoru, nelze je však nakonfigurovat tak, aby jeden z MCU pracoval současně jako zdroj hodinového signálu pro zbylé dva. Maximální frekvence obvodu krystalového oscilátoru MCU je omezena na 10 MHz, přičemž pro dosažení plného výkonu MCU ji lze vnitřně vynásobit obvodem fázového závěsu s pevně daným poměrem 4× na 40 MHz. Tato frekvence však již není přístupná na žádném vývodu a nelze ji tedy zavést jako externí hodinový signál do zbylých MCU. Dekodéry HCTL2032 pracují s maximální frekvencí hodinového signálu 33 MHz, tudíž je pro ně odvozeno nižší taktování 20 MHz vydělením základní frekvence oscilátoru obvodem IC2.

Ovládání

Ovládání celé řídicí jednotky je pro jednoduchost řešeno pouze několika tlačítky, indikačními LED a sedmisegmentovým displejem pro zobrazení nastavené rychlosti. Funkce tlačítek jsou:

- START/STOP spustí nebo zastaví pohony
- RESET provede RESET všech MCU, po kterém pohony provedou odměření svých referenčních poloh a najetí do startovních poloh pracovního cyklu.
- SPEED UP, SPEED DOWN volba rychlosti pohonů, kterou lze měnit v osmi krocích. Číslo rychlosti je zobrazeno na displeji.

Programovací rozhraní

K programování obsahu pamětí všech MCU je použit tzv. "in circuit debugger" ICD 3 fy. Microchip, viz [8]. Toto zařízení zprostředkovává spojení programovaného MCU s vývojovým prostředím v PC přes rozhraní USB. Slouží jednak k programování MCU, především však k odlaďování programu přímo v cílové aplikaci bez nutnosti simulace. V tomto módu je čten obsah vnitřních registrů a odesílán do vývojového prostředí Microchip MPLAB v PC, kde lze při krokování programu sledovat činnost MCU. Komunikace probíhá sériově po dvou vyhrazených vývodech (PGD – data, PGM – hodiny).

Konstrukce

Jelikož během vývoje bylo nutné provádět v zapojení poměrně časté změny, byla řídicí jednotka realizována na nepájivém kontaktním poli. Vzhledem k tomu, že se jedná pouze o číslicové obvody, to při dodržení správného blokování napájecích vývodů integrovaných obvodů není na závadu. Napájení zajišťuje laboratorní zdroj, potřebné vstupní a výstupní signály jsou vydeny na konektory přišroubované k nepájivému poli, viz obrázek 3.2.



Obrázek 3.2: Fyzické provedení řídicí jednotky

3.2 Návrh FW

Jako firmware (FW) je obecně označován software, který je nedílnou součástí elektronického zařízení a je vázán na konkrétní HW, v tomto případě na typ MCU. Řídicí jednotka obsahuje celkem trojici FW:

- 1. **FW MASTER MCU** Zabezpečuje dohled nad celkovým chodem řídicí jednotky, plní pouze jednoduchou funkci.
- 2. FW SLAVE MCU $(2\times)$ Zajišťuje vlastní vykonávání pohybu každého pohonu na základě povelů od MASTER MCU.

Firmware všech MCU je napsán v jazyku symbolických instrukcí MPASM fy. Microchip [9]. Důvodem je nutnost přesného časování částí programu, které musí mít i při různém větvení konstantní počet instrukčních cyklů. To u kódu generovaného např. překladačem z jazyka C nelze obecně zajisit a navíc lze ručně psaný kód optimalizovat dle potřeb. Zdrojové kódy jsou na přiloženém CD. Firmware obou SLAVE MCU vykonává tyto funkce:

- Generování řídicích pulzů (PLS) dle požadovaného průběhu a směru (DIR)
- Generování delších časových prodlev
- Změna rychlosti provádění celé sekvence
- Kontrola polohy kliky ve stanoveném bodě pracovního cyklu
- Nalezení referenční polohy kliky a najetí do výchozí polohy pro spuštění pohonu

3.2.1 Příkazy pro zadání průběhů

Jelikož instrukční sada MCU obsahuje speciální instrukce pro práci s tabulkami uloženými v paměti programu, jsou požadované zdvihové funkce do MCU zadávány právě tímto způsobem. Specialitou je tabulkový ukazatel, pomocí kterého lze nepřímo přistupovat na kteroukoli adresu v celé paměti programu bez nutnosti jejího stránkování. Šířka slova programové paměti je 16 bitů, lze tedy do jednoho slova uložit obsah celého časovače. Jelikož je MCU jinak 8 bitový, je nutno číst z paměti postupně nižší a vyšší byte.

Paměť programu vyhrazená pro tabulky je rozdělena na osm bloků proměnné délky, do kterých lze uložit nezávislé sekvence. Výběr generované sekvence provádí MASTER MCU. Toto je využito pro změnu rychlosti pohonů, kterou není možné vzhledem k povaze navržené metody řízení provádět např. pouhou změnou frekvence hodinového signálu MCU, ale je nutné mít pro každou rychlost jiný průběh budicí funkce.

Pro účely řízení krokového motoru jsou definovány čtyři vlastní příkazy, které program dokáže rozlišit a vykonat, viz. tabulka 3.1. Nejvyšší dva bity čteného slova určují operaci, zbývajících 14 bitů je hodnota časovače. Příkazy jsou vykonávány v pořadí, v jakém jsou zapsány v paměti. Rozvržení paměti programu SLAVE MCU a způsob uložení příkazů je na obrázku 3.3. Zobrazená sekvence odpovídá pohonu horní JT (A), dle obrázku 1.2.

příkaz	bit 15	bit 14	funkce
puls CCW	0	0	krok proti směru hod. ručiček
puls CW	0	1	krok ve směru hod. ručiček
pauza	1	0	čekání bez generování pulzů
konec	1	1	zastavení čtení příkazů

Tabulka 3.1: Kódování příkazů pro zadání průběhů

Generování přesných časových intervalů je založeno na přerušení od časovače MCU a to jak pro krátké intervaly mezi jednotlivými pulzy, tak pro delší časové prodlevy. Časovač má šířku 16 bitů a předděličku s dělicím poměrem v rozsahu 1:1 až 1:256. Vstupním signálem je frekvence oscilátoru dělená čtyřmi, tj. 10 MHz.

Rozsah časových intervalů, které lze generovat, je zdola omezen délkou obsluhy přerušení, která se musí při každém kroku vykonat. Obsluha trvá 40 instrukčních cyklů, tudíž minimální odstup pulzů, resp. jejich náběžných hran, je 4 μ s. Lze tak generovat frekvenci až 250 kHz, což je zároveň nejvyšší frekvence, kterou dokáže zpracovat budič krokového motoru². Rozlišení času odpovídá jednomu instrukčnímu cyklu, tj. 100 ns. Maximální čas je dán šířkou slova 14 bitů, poměrem předděličky časovače a vstupní frekvencí. Pro příkazy generování pulzů PULS CCW, PULS CW je předdělička vypnuta (poměr 1:1) a maximální čas je při frekvenci oscilátoru 40 MHz cca 1,6 ms.

 $^{^2}$ Maximální frekvence řídicích pulzů nezávisí na nastaveném rozlišení mikrokrokování, tudíž při nejvyšším rozlišení 10 000 pls/ot lze dosáhnout otáček nejvýše 1500 ot/min, i když maximální otáčky motoru jsou 4 000 ot/min. Plné otáčky motoru lze využít pouze při nižším rozlišení mikrokrokování

Jelikož je tento čas poměrně krátký vůči dobám požadovaných prodlev, které jsou řádově v desítkách ms, byl definován příkaz PAUZA, který má předděličku časovače nastavenou na poměr 1:32 a lze s ním generovat zpoždění až 52,4 ms. Pokud je potřeba ještě delší čas, složí se z několika těchto příkazů za sebou. Zařazením předděličky se rozlišení času zhorší na 3,2 μ s, což je však vzhledem k časům požadovaných prodlev zanedbatelné.

Příkaz KONEC říká programu, že dosáhl konce sekvence a nemá pokračovat ve čtení dalších příkazů. Program poté čeká na další spuštění. Dolních 14 bitů se u tohoto příkazu nevyhodnocuje.



Obrázek 3.3: Rozdělení paměti programu

3.2.2 Algoritmus generování průběhů

Chod celého programu je řízen pomocí přerušení, které má u použitého MCU dvě úrovně priority. Přerušení nízké priority je použito pro spouštění vykonávání naprogramované sekvence pomocí vstupu vnějšího přerušení, který je ovládán z MASTER MCU (signál RUN/HALT). Přerušení vysoké priority je vyhrazeno pro přerušení časovače a slouží ke generování signálů řídicího pulzu (PLS) a směru kroku (DIR). Jeho obsluha je znázorněna ve zjednodušeném vývojovém diagramu na obrázku 3.4.

Při vyvolání přerušení se nejdříve testuje, zda toto přerušení není prvním po pauze. Pokud ano, není generován signál PLS (řídicí puls), pouze se přečte další příkaz z tabulky. Podle významu příkazu se program dále větví. Pro příkazy pulzů se nastaví signál DIR (směr) a hodnota časovače, která udává čas do dalšího přerušení. Nakonec je časovač spuštěn, obsluha přerušení se ukončí a program čeká v prázdné hlavní smyčce na další přerušení. Pro příkaz pauzy je situace podobná, pouze se místo nastavení směru provede nastavení příznaku pauzy a změna dělicího poměru předděličky časovače na 1:32. Příkaz konce sekvence provede kontrolu skutečné polohy pohonu na konci sekvence. Pokud se liší



Obrázek 3.4: Obsluha přerušení časovače

od požadované (s jistou tolerancí), je nastaven příznak chyby, rozsvítí se indikační LED a provádění programu se zcela zastaví. Nové spuštění je možné až po resetu MCU.

Vynechávání pulzu po pauze má dvojí význam. V počátku pohybu nesmí být puls generován, protože motor stojí ve výchozí poloze a čeká až na puls, který jej posune na první krok. I když je však vynechán řídicí puls, je generován signál směru, který je platný pro puls následující.

3.2.3 Synchronizace pohonů

Synchronizace chodu dvojice pohonů je zajištěna koncepcí MASTER – SLAVE. Po zapnutí napájení provedou oba SLAVE MCU odměření referenční polohy a najetí do výchozí polohy před spuštěním. Po dokončení těchto operací oznámí hlavnímu MASTER MCU připravenost pro spuštění nastavením signálů READY A a READY B do log. 1. Vykonávání sekvencí pohonů A, B je spuštěno společným signálem RUN/HALT, resp. jeho náběžnou hranou. Na ni SLAVE MCU reagují v obsluze přerušení nízké priority spuštěním sekvence a nastavením signálů READY A a READY B do log. 0. Po úspěšném dokončení sekvencí se tyto signály opět nastaví do log. 1, což MASTER MCU vyhodnotí jako připravenost na nové spuštění, signál RUN/HALT na okamžik přejde do log. 0, aby mohla být vzápětí generována nová náběžná hrana pro spuštění další periody zdvihových funkcí obou pohonů.

Pokud z nějakého důvodu jeden ze SLAVE MCU nenastaví svůj READY signál do log. 1, nevygeneruje MASTER MCU náběžnou hranu na signálu RUN/HALT a tím je zabráněno spuštění pohonů, které by mohlo vést k neočekávané kolizi JT. Po odstranění závady je nutné celou řídicí jednotku restartovat.

Synchronizace pohonů v rámci jedné periody pracovního cyklu je v režii výpočtu budicích sekvencí, který je popsán v části 4.3.2. Výpočet musí zajistit, aby průběhy uložené do pamětí SLAVE MCU byly vůči sobě správně časově posunuty.

3.2.4 Odměřování referenční polohy

Jelikož generování polohy krokového motoru i její odměřování jsou relativní vůči počáteční hodnotě, je nutné tuto hodnotu při každém spuštění stroje definovat. Zpravidla se k tomuto účelu používají různé koncové spínače, ať už optické, indukčnostní či mechanické. Klíčová je zde přesnost a opakovatelnost detekované polohy. Požadovaná tolerance polohy JT je stanovena na 0,2 mm, což je hodnota, kterou s levnými snímači nelze dosáhnout a nasazení drahého snímače pouze pro nalezení referenční polohy, byť je důležitá, je finančně nákladné.

Hledání referenční polohy proto bylo vyřešeno poměrně netradičním způsobem s využitím polohové zpětné vazby motoru, která bude v nějaké podobě přítomná vždy. Zdvih klikového mechanismu je vymezen kluznými vodicími pouzdry JT a objímkou s čepem pro ojnici, která je na JT umístěna mezi pouzdry. JT má proto na každé straně mechanický doraz, přičemž jeden z těchto dorazů je definován jako referenční poloha JT. Její vyhledání probíhá pomalým posouváním JT směrem k dorazu (rychlostí cca 1 mm/s) a současným odměřováním polohy IRC snímačem. Referenční poloha je vyhodnocena jako stav, kdy se po opření objímky JT o doraz přestane měřená poloha měnit. Potom se pohyb zastaví a provede se najetí JT do výchozích poloh před spuštěním sekvencí. Zde se provede vynulování čítačů v dekodérech polohy a od tohoto místa se potom poloha za chodu odměřuje.

Opakovatelnost této metody je dána přesností polohování krokového motoru. Při rozlišení 10 000 kroků/ot a provozu na modelu se setrvačníkem prakticky dosahovala nejvýše dvou kroků, tj. 0,072°. Na funkčním modelu šicího stroje se vlivem vyšších pasivních odporů opakovatelnost pohybovala mezi dvěma až čtyřmi kroky, tj. nejvýše 0,144°. Tomu dle obrázku 2.4 odpovídá zdvih řádově v setinách mm, což je zcela dostačující přesnost.

Kapitola 4

Návrh metody řízení

4.1 Požadavky a omezení

Pro řízení pohonu JT jsou stanovena tři hlavní kritéria s následující prioritou:

- 1. Dosažení výdrží s požadovanou přesností $0,2 \text{ mm } (0,7^{\circ})$ pro spolehlivé předání jehly. To se týká zejména překmitů na konci zdvihu T1.
- Časově optimální přechod mezi výdržemi JT, jelikož doba trvání zdvihů spoluurčuje dosažitelnou rychlost celého stroje.
- 3. Minimální dynamický moment během zdvihu, kvůli snížení nároků na pohon.

Tyto požadavky jsou dosti protichůdné, body 1 a 3 jsou snadno řešitelné zpomalením zdvihů, což ovšem vylučuje bod 2. Z bodů 2 a 3 vycházela volba zdvihové funkce již pro návrh pohonu se servomotory na KTS FS TUL (viz obr. 2.6). Při prvních pokusech s krokovým motorem byly sekvence pohonů sestaveny z takto konstruovaných zdvihových funkcí a naprogramovány do řídicí jednotky. Příslušná odezva pohonu zatíženého setrvačníkem je pro rychlost 250 cyklů/min uvedena na obrázku 4.1. Je vidět, že ustálení polohy je provázeno značnými překmity¹. Ve vyznačeném místě dosahují hodnoty přibližně 3°, což je daleko za stanovenou hranicí $\Delta \varphi = 0.7^{\circ}$. Příčinou je překročení momentu motoru, viz momentová charakteristika na obrázku 2.7, čímž je uvedena do činnosti kontrolní zpětná vazba budiče motoru. Ta sice zabrání ztrátě kroku při přetížení a poloha se nakonec ustálí na správné hodnotě, ustálení je však provázeno překmity.

Jelikož jsou možnosti řízení krokových motorů ve srovnání s klasickými servopohony výrazně omezené, je jedním z mála způsobů dosažení stanovených požadavků optimalizace budicí funkce tak, aby odezva na ni byla co nejbližší požadovanému průběhu. Přitom by během zdvihů nemělo docházet k aktivaci kontrolní zpětné vazby budiče, tj. polohová odchylka by měla být menší než 1,8°.

¹Překmitem, resp. amplitudou překmitu, je myšlen rozdíl hodnoty maximálně dosažené a ustálené



Obrázek 4.1: Odezva pohonu bez řízení (zatíženo setrvačníkem)

4.2 Metoda řízení a identifikace

4.2.1 Dopředné řízení bez zpětné vazby

Pro optimalizaci zdvihové funkce byla zvolena metoda dopředného řízení bez zpětné vazby. Tato metoda vyžaduje matematický model řízené soustavy ve formě obrazového přenosu, který byl získán experimentální identifikací. Obecným principem je vložení kompenzačního filtru mezi vstup žádané hodnoty a řízenou soustavu. Přenos tohoto filtru obsahuje inverzní přenos regulované soustavy, čímž lze dosáhnout zmírnění vlivu její dynamiky na výslednou odezvu. Pro splnění fyzikální realizovatelnosti filtru je nutné jeho přenos doplnit nezbytným počtem pólů.

Přínos této metody spočívá v odstranění nežádoucích překmitů. Řízená soustava, tvořená budičem, krokovým motorem a setrvačníkem, resp. klikovým mechanismem, je modelována přenosem, který se snaží vystihnout charakter kmitů soustavy. Inverzí tohoto přenosu se získá filtr, který upraví požadovanou zdvihovou funkci tak, že odezva soustavy na ni bude v ideálním případě aperiodická, neboli dojde k eliminaci komplexních pólů modelu soustavy nulami filtru v celkovém přenosu. Odpovídající blokové schéma je na obrázku 4.2.



Obrázek 4.2: Blokové schéma dopředného řízení

4.2.2 Struktura modelu

Ačkoli je krokový motor ze své fyzikální podstaty kmitavá nelineární soustava, byl v první fázi pro zjednodušení modelován lineárním přenosem druhého řádu s komplexními póly, tj. nejjednodušším modelem, kterým lze aproximovat tlumené kmitání [10]. Modelovaný přenos zahrnuje budič motoru, samotný motor a konkrétní zátěž, což je buď setrvačník, nebo klikový mechanismus. Zvolený obrazový přenos soustavy má tvar:

$$F_{KM}(s) = \frac{k}{(Ts)^2 + 2\xi Ts + 1}$$
(4.1)

Význam koeficientů přenosu je následující:

- k statické zesílení soustavy. Uvažovaný přenos je přenosem polohy, tzn. $k{=}1.$
- T násobná časová konstanta, $T = 1/\omega_N$, kde ω_N [rad/s] je přirozená úhlová frekvence.
- ξ poměrné tlumení soustavy

4.2.3 Identifikace

Identifikace parametrů zvolené struktury modelu byla provedena z naměřené odezvy. Budicí funkce, použitá pro identifikaci, je, na rozdíl od buzení používaného u varianty stroje se servomotory, sestavena z čistě sinusových průběhů zrychlení, které proto obsahují skokovou změnu na začátku a konci průběhu. Překmity jsou tak ještě výraznější, než na obrázku 4.1, což pro účely identifikace není na závadu.

Princip parametrické identifikace je popsán v [11] a základní algoritmus výpočtu uvádí obrázek 4.3. Pro požadované buzení w(t) je změřena odezva reálné soustavy y(t) a pro zvolenou strukturu modelu je opakovaně počítána odezva modelu $y_M(t)$. Oba průběhy vstupují do výpočtu kvadratického kritéria, které hodnotí míru shody odezvy modelu s odezvou měřenou. Na základě hodnoty kritéria se upravuje vektor proměnných parametrů modelu tak, aby se hodnota kritéria minimalizovala. Použité kritérium je předepsáno vzahem:

$$J(\xi, T) = \sum_{k=1}^{N} \left[y(k) - y_M(k) \right]^2, \qquad (4.2)$$

Identifikace byla provedena pro 8 různých rychlostí, jejichž konkrétní volbu uvádí tabulka 4.1. Rychlost 100 % odpovídá 250 cyklům/min. Pro identifikaci byl použit zdvih



Obrázek 4.3: Princip parametrické identifikace

T1, o který při optimalizaci zdvihové funkce jde především. Časové průběhy, srovnávající reálnou odezvu s odezvou identifikovaného modelu, jsou uvedeny v příloze A. Z průběhů je patrné, že perioda kmitů reálného pohonu postupně klesá, což je znakem nelinearity soustavy. Aproximace lineárním modelem je tedy poměrně hrubá, a vystihuje spíše jen první periodu překmitů. Identifikované parametry modelu pro všechny rychlosti jsou uvedeny v tabulce 4.1.

1	rychlos	st	parametry	
označení	[%]	[cyc/min]	ξ	Т
1	65	162	0.094	0.0013
2	70	175	0.093	0.0013
3	75	187	0.095	0.0013
4	80	200	0.093	0.0014
5	85	212	0.091	0.0014
6	90	225	0.104	0.0015
7	95	237	0.101	0.0018
8	100	250	0.112	0.0021

Tabulka 4.1: Výsledky identifikace pro různé rychlosti

Názorněji lze výsledky identifikace zobrazit pomocí frekvenčních přenosů, viz obrázek 4.4. Je patrné, že frekvence vybuzených kmitů vlivem nelinearity závisí na jejich počáteční amplitudě. Pro první tři rychlosti je frekvence kmitů téměř totožná (cca 120 Hz), zatímco pro vyšší rychlosti, kde jsou překmity výraznější, frekvence klesá až na cca 75 Hz.

4.2.4 Návrh kompenzačního filtru

Jelikož je identifikovaný model pouze velmi přibližnou aproximací reálné soustavy, která navíc své parametry mění, slouží nalezené parametry spíše jako počáteční odhady hledaných parametrů kompenzačního filtru. Pro dosažení optimálních výsledků bylo nutné hodnoty jeho parametrů doladit experimentálně na základě měření. Přenos kompenzačního



Obrázek 4.4: Frekvenční přenosy identifikovaných modelů

filtru pro zvolenou strukturu modelu má tvar:

$$F_{FIL}(s) = \frac{(Ts)^2 + 2\xi Ts + 1}{(\tau s + 1)^n},$$
(4.3)

kde význam parametrů čitatele přenosu odpovídá parametrům modelu soustavy (výraz 4.1), τ je časová konstanta pólu filtru s násobností n. Tento přidaný pól zajišťuje fyzikální realizovatelnost filtru, tzn. pro čitatel druhého řádu je řád jmenovatele n = 3. Jeho vlivem však vzniká přídavné zpoždění, které je nutné zpětně kompenzovat optimalizací (posunem a zkrácením) požadovaného budicího průběhu w(t). O tom je podrobněji pojednáno v části 4.3.1.

Časová konstanta τ je volena podle výsledné frekvenční charakteristiky filtru tak, aby magnituda nenarůstala přes 0 dB, neboli, aby filtr žádnou část spektra nezesiloval. Ideální situace ve frekvenční oblasti je uvedena na obrázku 4.5.

4.3 Výpočty budicích průběhů

4.3.1 Optimalizace

Budicí průběhy obou pohonů jsou sestaveny z několika úseků, tak jak byly popsány v 1.2. Úseky zdvihů (T1, T2 a T3) jsou zadány dobou trvání, velikostí zdvihu, resp. odpovídajícím úhlem pootočení a časem počátku v rámci celého cyklu. Časový průběh



Obrázek 4.5: Vliv filtru ve frekvenční oblasti (ideální případ, rychlost 8)

natočení odpovídá části periody funkce sinus, není zde tedy použit průběh zrychlení se zpomaleným náběhem, jako pro pohon se servomotory. Odstranění nežádoucího skoku ve zrychlení je zajištěno filtrací požadovaného průběhu kompenzačním filtrem.

Zpoždění způsobené přidanými póly filtru je kompenzováno zpětnou optimalizací požadovaného průběhu $w_{OPT}(t)$ tak, aby na výstupu filtru byl takový průběh budicí funkce u(t), že odezva modelu soustavy $y_M(t)$ na u(t) bude co nejbližší požadovanému průběhu w(t). Schematicky je tento proces znázorněn na obrázku 4.6.



Obrázek 4.6: Postup optimalizace budicího průběhu

Na počátku výpočtu jsou definovány parametry požadovaného průběhu w(t), jehož zdvihy jsou sestaveny z čistě sinusových úseků. Podle navržených požadovaných parametrů se nastaví i počáteční parametry v prvním kroku optimalizace. Průběhem w(t) je buzen navržený kompenzační filtr, na jehož výstupu je budicí průběh u(t). Ten je sledovaným výstupem celé optimalizace a jeho výsledný tvar se po ukončení optimalizace použije pro generování tabulek pro SLAVE MCU. Odezva soustavy (pohonu a zátěže) $y_M(t)$ na toto buzení je simulována pomocí modelu soustavy získaného z identifikace a vstupuje do výpočtu kritéria spolu s požadovaným průběhem w(t). Kritérium je stejně jako u identifikace kvadratické a optimalizační funkce se snaží minimalizovat jeho hodnotu pomocí změny parametrů optimalizovaného požadovaného průběhu $w_{OPT}(t)$.

Optimalizovanými parametry průběhu $w_{OPT}(t)$ jsou délka a posun úseku T1, délka, posun a úhel úseku T2 a délka úseku T3, celkem tedy šest parametrů. Optimalizace byla provedena pomocí vlastního výpočtového programu v jazyce MATLAB, s využitím optimalizační funkce **fminsearch**. Tato funkce hledá lokální minimum funkce více proměnných v okolí zadaných počátečních parametrů, což je určité úskalí celého výpočtu, jelikož pro spolehlivé nalezení optimalizovaného průběhu $w_{OPT}(t)$ je nutné šestici počátečních parametrů znát poměrně přesně. To je jeden z důvodů, proč je optimalizace provedena zvlášť pro úsek T1 a zvlášť pro úseky T2, T3, které jsou optimalizovány jako celek. Rozdělením se snížení počet parametrů optimalizací, což má příznivý vliv na schopnost konvergovat k hledanému řešení. Druhý důvod vyplývá z toho, že sekvence obou pohonů jsou až na pořadí jednotlivých úseků stejné, takže stačí provést jednu optimalizaci a výsledné dílčí průběhy se použijí pro sestavení sekvencí obou pohonů. To zároveň zaručí, že budicí průběhy u(t)obou pohonů budou tvarově a časově stejné.

Na obrázcích 4.7 a 4.8 jsou uvedeny výsledky optimalizace provedené pro rychlost 8, tj. 250 cyklů/min. Označení průběhů odpovídá schématu optimalizace na obrázku 4.6. Z obrázků je patrný předstih $w_{OPT}(t)$ před zbývajícími průběhy, kterým je kompenzováno zpoždění filtru. V detailech doběhů jsou vidět rozdíly v průbězích w(t), které jsou úseky funkce sinus, a u(t), které již vlivem filtrace nemají ostrý přechod, což vede na aperiodický průběh odezvy $y_M(t)$.

V detailu na obrázku 4.8 je dále patrný význam toho, proč optimalizovaným parametrem je i úhel úseku T2. Na vrcholu překmitu mezi úseky T2 a T3 nenastává ustálený stav a proto je nutné hodnotu úhlu budicí funkce u(t) prostřednictvím změny $w_{OPT}(t)$ snížit tak, aby výsledná odezva $y_M(t)$ odpovídala w(t). Vzhledem k tomu, že model je pouze přibližnou aproximací soustavy, neočekává se dosažení přesné hodnoty překmitu, ta ale není kritická. Výhodou je naopak vyšší plynulost pohybu a tím i nižší hluk. Varianta s ustáleným stavem byla také vyzkoušena, ovšem potom již byl problém dosáhnout požadovaného času zdvihu T3, který se musel zkrátit o dobu ustalování zdvihu T2.



Obrázek 4.7: Optimalizace úseku T1



Obrázek 4.8: Optimalizace úseků T2 a T3

4.3.2 Generování tabulek pro MCU

Sekvence každého pohonu je sestavena z šesti úseků: tří zdvihů a tří prodlev (viz obrázek 1.2). Do tabulek příkazů pro SLAVE MCU se ukládají jednak průběhy u(t) jednotlivých úseků (T1, T2, T3) a také doby prodlev mezi nimi (P1, P2, P3). Ty se musí na základě výsledků optimalizace přepočítat, aby celková délka periody byla stejná jako požadovaná. Optimalizované průběhy jednotlivých úseků totiž vycházejí s mírně delší dobou trvání.

Vlastní generování tabulek příkazů má tři fáze:

- 1. Rozložení sekvence na prodlevy a monotónní zdvihy Toto je zabezpečeno již tím, že optimalizované průběhy u(t) jsou počítány samostatně. Pouze je nutné určit přechod mezi úseky T2 a T3, kde dochází ke změně směru.
- 2. Výpočet časů mezi pulzy a jejich směru Zde se vychází z toho, že řízení krokového motoru se provádí opačně, než řízení servopohonů, kde se zpravidla v pevném časovém rastru předepisuje velikost přírůstku polohy. U krokového motoru je tento přírůstek dán velikostí jednoho kroku, tudíž se poloha předepisuje časem vykonání pulzu, resp. rozdílem časů mezi řídicími pulzy. Jedná se tedy vlastně o výpočet inverzní funkce. Ten je proveden pomocí lineární interpolace, kdy se ve vypočteném budicím průběhu u(t) hledají časy, které odpovídají polohám diskrétních kroků motoru. Diferencí těchto časů se získá vektor časů mezi řídicími pulzy pro uložení do tabulky v paměti SLAVE MCU.
- 3. Ukládání příkazů pulzů a prodlev do souborů v definovaném pořadí V tomto bodě jsou vypočtené časy mezi pulzy korigovány o délku obsluhy přerušení, časy prodlev větší než 52 ms jsou rozděleny na více příkazů a zaokrouhleny na celý násobek 3,2 μs. Na základě informace o směru kroku jsou vytvořeny kompletní příkazy definované v tabulce 3.1. Závěrem se vygenerují výstupní soubory s tabulkami příkazů pro oba pohony.

Celý výpočet byl naprogramován v MATLABu, program je na přiloženém CD. Schematický postup je naznačen na obrázku 4.9. Výchozí parametry jsou zadané pro maximální uvažovanou rychlost stroje 250 cyklů/min. Jelikož je výsledný průběh u(t) ve své podstatě řešením diferenciální rovnice (řešené numericky), závisí na konkrétní rychlosti. Proto je nutné optimalizaci opakovat pro každou rychlost zvlášť. Pokud by tomu tak nebylo, a optimalizace by se provedla pouze pro nejvyšší rychlost, přičemž průběhy pro nižší rychlosti by se odvodily poměrným vynásobením časů, byly by odezvy na nižších rychlostech zbytečně pomalé, jelikož se při nich vlastní dynamika soustavy tolik neprojeví.

Vygenerované soubory jsou volány jako externí vstup při kompilaci programů pro SLAVE MCU a data z nich jsou vložena do paměti programu na pevně vyhrazenou adresu, viz začátek sekvence 1 na obrázku 3.3. Kromě samotných dat se generují ještě soubory



Obrázek 4.9: Algoritmus generování výstupních souborů

s osmi definovanými adresami začátků sekvencí, které se do programu MCU uloží jako konstanty. Za chodu se v každém cyklu před začátkem čtení sekvence příkazů provede nastavení rychlosti, které nastaví ukazatel tabulky v paměti programu MCU na pozici danou jednou z osmi adres. Po dosažení konce vybrané sekvence program opakuje čtení opět od této adresy, dokud není rychlost opět změněna. Tímto způsobem je zaručeno, že změna rychlosti se projeví až na začátku dalšího pracovního cyklu a nikdy ne v jeho průběhu.

Kapitola 5

Výsledky v reálném provozu

5.1 Model se setrvačníkem

5.1.1 Zkušební přípravek

Jak již bylo zmíněno, byla reálná zátěž v první fázi zkoušek nahrazena setrvačníkem, který simuloval dynamické zatížení motoru. Během této fáze byl hledán vhodný způsob synchronizace pohonů a probíhalo celkové odlaďování HW i FW řídicí jednotky. Výsledkem byly finální varianty schématu zapojení, firmware SLAVE i MASTER MCU a skriptů v MATLABu pro výpočet a optimalizaci budicích funkcí. Při přechodu na funkční model šicího stroje se tak nemuselo již nic zásadního upravovat.

Pro testování pohonů se setrvačníky byl na pracovišti KTS FS TUL navržen a zkonstruován zkušební přípravek, na který byly namontovány oba krokové motory, setrvačníky a IRC snímače polohy, viz obrázek 5.1. Na setrvačnících byly umístěny výstupky, které se mohly opřít o dorazy na rámu, čímž byla ověřována funkce odměřování referenční polohy najížděním na mechanický doraz.



Obrázek 5.1: Model a fotografie zkušebního přípravku

5.1.2 Dosažené výsledky

První výsledky z měření se setrvačníky přinesla již identifikace modelu pohonu. Na základě jejích výsledků byl navržen kompenzační filtr s inverzním přenosem. Nastavení parametrů modelu a filtru přesně podle identifikace však nevedlo k optimálním výsledkům. Překmity při ustalování na konci zdvihu sice byly výrazně nižší, než při buzení nefiltrovaným průběhem, ale pomocí dalšího experimentálního nastavení parametrů bylo dosaženo výsledků ještě výrazně lepších. Hodnoty výsledných parametrů filtru a modelu soustavy jsou následující:

$$\tau = 0,0008; \quad \xi = 0,05; \quad T = 0,00119$$

Rozdíl je zejména v tlumení ξ , které vychází řádově o polovinu nižší, než jsou hodnoty získané z identifikace.

Jelikož chování obou pohonů v provozu se setrvačníky bylo téměř identické, jsou měření zpracována pouze pro pohon A. Naměřené odezvy y(t) pro všech osm rychlostí jsou uvedeny v příloze A, výsledek měření na nejvyšší rychlosti je uveden na obrázku 5.2. Do společných grafů jsou zakresleny i požadované průběhy w(t), které byly ukládány během výpočtu budicí funkce, právě pro možnost pozdějšího srovnání s naměřenou odezvou. Pro větší přehlednost jsou z průběhů požadované polohy w(t) a naměřené polohy y(t)vypočteny průběhy odchylek e(t) = w(t) - y(t).



Obrázek 5.2: Naměřená odezva na modelu se setrvačníkem (rychlost 8)

Z nich jsou patrné dosahované hodnoty polohových odchylek během zdvihů i překmity během ustalování ve výdržích. Sledovaným místem je zejména šipkami vyznačený konec zdvihu T1, kde se objevují nežádoucí překmity. Jejich orientační hodnoty, odečtené z grafů, jsou shrnuty v tabulce 5.1. Pro všechny rychlosti je splněna stanovená podmínka maximální hodnoty překmitu 0,7° a to s bezpečnou rezervou. Odchylky žádané a naměřené polohy během zdvihů jsou poměrně výrazné a jsou zřejmě způsobeny aproximací lineárním modelem, který nevystihuje přesně dynamiku v rámci celého zdvihu.

označení	rychlost [%]	úhlový překmit [°]
1	65	0.052
2	70	0.055
3	75	0.072
4	80	0.072
5	85	0.11
6	90	0.15
7	95	0.18
8	100	0.11

Tabulka 5.1: Amplitudy překmitů na modelu se setrvačníkem

Z grafů je dále vidět, že v ustáleném stavu během výdrže zůstává trvalá odchylka o hodnotě cca $0,14^{\circ}$, která je způsobena pasivními odpory a nenulovou poddajností motoru. Pro přesné dosažení požadované polohy by tato hodnota měla být přičtena k hodnotě původně požadované, případně by se dalo zvýšit statické zesílení v modelu motoru, které bylo uvažováno jako k=1.

5.2 Model šicího stroje

5.2.1 Popis funkčního modelu

Pro účely testování dynamického chování reálného mechanismu JT s klikovým převodem byl na pracovišti KTS FS TUL navržen funkční model, který sestává z ocelové desky, na niž jsou umístěny domečky s kluznými pouzdry obou jehelních tyčí, klikové mechanismy a motory, viz CAD model na obrázku 5.3. Tento model byl původně navržen pro variantu se servomotory, u kterých nebylo nutné natočení hřídelů dodatečně odměřovat. Pro použití krokových motorů však musel být doplněn o držáky inkrementálních snímačů a spojky pro jejich spojení s motory, viz foto měřicího pracoviště na obrázku 5.4¹. Protože motor nemá vyvedenou hřídel i z druhé strany, musely být IRC snímače namontovány na přední stranu desky, ke klikového mechanismu.

 $^{^1 {\}rm Standartní poloha JT je svislá, funkční model byl položen na bok pro lepší přístup k součástem mechanismu ve stísněném prostoru$



Obrázek 5.3: CAD model šicího stroje, převzato z [2]



Obrázek 5.4: Měřicí pracoviště

5.2.2 Dosažené výsledky

Jako výchozí nastavení pro provoz krokových motorů s reálnou zátěží bylo použito nastavení získané během zkoušek se setrvačníkem, byly tedy použity stejné průběhy budicích funkcí. Výsledky měření, uvedené v příloze C, ukázaly, že toto nastavení bylo vyhovující a vedlo k dosažení vyhovujících výsledků. Nebylo tedy nutné znovu provádět identifikaci. Jelikož i výsledné nastavení kompenzačního filtru při zkouškách se setrvačníky bylo nakonec nalezeno experimentálně, neměla by nová identifikace velký přínos, což je dáno i tím, že model soustavy je pouze poměrně hrubou aproximací.

Jedinou změnou v programech je zanesení skutečně odměřených rozměrů uložení JT a jejích dorazů, které slouží k nalezení referenční polohy JT. Z těchto hodnot a požadovaných počátečních poloh JT jsou vypočítány úhly a posléze počet kroků, o který se musí motor z referenční polohy pootočit. Vypočtené hodnoty jsou uloženy jako strojní konstanty do paměti obou SLAVE MCU.

Grafy v příloze C jsou zpracovány stejným způsobem, jako příloha B. Opět jsou uvedeny pouze průběhy získané z měření na pohonu A horní jehelní tyče, přičemž dynamické chování pohonu B vykazovalo pouze minimální odchylky. Měření pro nejvyšší rychlost 250 cyklů/min je uvedeno na obrázku 5.5.



Obrázek 5.5: Naměřená odezva s klikovým mechanismem (rychlost 8)

Amplitudy překmitů na konci zdvihu T1, jejichž hodnoty jsou pro všechny rychlosti shrnuty v tabulce 5.2, jsou přibližně pouze dvojnásobné, než u setrvačníků. To jsou poměrně pozitivní výsledky a i v tomto případě je splněna podmínka maximální hodnoty překmitu 0,7°. Ukázalo se, že k tlumení kmitů napomáhají pasivní odpory v uložení JT.

označení	rychlost [%]	úhlový překmit [°]
1	65	0.09
2	70	0.06
3	75	0.04
4	80	0.06
5	85	0.09
6	90	0.11
7	95	0.07
8	100	0.20

Tabulka 5.2: Amplitudy překmitů na modelu šicího stroje

Polohové odchylky během zdvihu zde dosahují vyšších hodnot, než při zatížení setrvačníkem, což je způsobeno zejména proměnným momentem setrvačnosti, který přibližně do poloviny zdvihu narůstá a v druhé polovině opět klesá a dále také pasivními odpory v uložení JT. Ty jsou i příčinou zvýšení polohové odchylky během prodlevy P2 na hodnotu 0,2 až $0,3^{\circ}$, což je však i v součtu s hodnotou překmitů stále v toleranci $0,7^{\circ}$.

Předávání jehly v této konfiguraci pohonů fungovalo spolehlivě při všech osmi rychlostech.

5.3 Cenové porovnání variant

Závěrem práce by mělo být uvedeno srovnání navrženého pohonu s krokovými motory s již dříve navrženou variantou pohonu se servomotory. Pro zadavatele i jeho případné zákazníky je hlavním sledovaným parametrem poměr cena/výkon. Zatímco dosažený výkon (rychlost stroje v cyklech/min) lze stanovit poměrně přesně, otázka ceny je složitější. Pro skutečně objektivní posouzení by kromě pořizovací ceny bylo nutné uvažovat také provozní náklady (spotřebu elektrické energie, resp. účinnost), provozní spolehlivost a životnost. To jsou parametry, které lze zjistit až dlouhodobějším testováním v provozu, do této fáze však vývoj inovované verze stroje zatím nedospěl. Proto bude brána v úvahu pouze pořizovací cena prostředků potřebných pro realizaci pohonu dvojice jehelních tyčí, tj. cena motorů a řídicí a výkonové elektroniky. Konkrétní použité typy a jejich orientační ceny jsou shrnuty v tabulce 5.3.

Prostředky pro	synchronní motor $(2\times)$	krokový motor $(2\times)$
realizaci	servo měnič $(2\times)$	budič $(2\times)$
pohonu	-	řídicí jednotka $(1 \times)$
	Control Technique CTM 4-07.3	Oriental motor ASM69ACE
Použité typy	Digitax DST 1401 Plus	Oriental motor ASD16D-C
	-	(dle vlastního návrhu)
Orientační ceny	18 000	4 000
při kusovém odběru,	32000	19000
podzim 2008 [CZK]	-	4 000 (odhad)
Celková cena	100 000	50 000
Max. rychlost	300 cyklů/min	250 cyklu/min
Cena / výkon	333	200

Tabulka 5.3: Stanove	ní poměru	cena/výkon
----------------------	-----------	------------

Závěr

Cílem diplomové práce bylo praktické ověření použitelnosti krokového motoru v dynamicky náročné aplikaci, kterou je pohon dvojice jehelních tyčí šicího stroje. Každá tyč je poháněna vlastním motorem, přičemž převod rotačního pohybu na lineární zdvih je realizován klikovým mechanismem. V rámci práce byla řešena přesnost polohování s ohledem na vlastní dynamiku pohonu i vzájemná synchronizace dvojice pohonů.

Pro účely práce byla použita moderní sestava krokového motoru a budiče, která disponuje polohovou zpětnou vazbou, jež je schopna zabránit ztrátě kroku při krátkodobém přetížení. Ukázalo se, že pro dosažení požadované přesnosti polohování tato zpětná vazba nedostačuje. Nemá žádné nastavitelné parametry, jako např. klasická kaskádní regulace u servopohonů, a tudíž neposkytuje prostor k vyladění odezvy. Problémem byly zejména překmity na konci zdvihu jehelní tyče, způsobené momentem setrvačnosti zátěže a nevhodným průběhem zdvihové funkce. K odstranění tohoto jevu byla navržena metoda dopředného řízení bez zpětné vazby, jejímž cílem je optimalizace budicího průběhu tak, aby odezva motoru na něj byla pokud možno aperiodická. Pro tento účel byl identifikací získán aproximační model řízené soustavy, na jehož základě byl navržen kompenzační filtr s inverzním přenosem.

Praktická realizace si vyžádala návrh vlastní experimentální řídicí jednotky. Ta umožňuje synchronizované řízení dvou krokových motorů a generování průběhů s obecným průběhem zrychlení, což je nezbytné pro realizaci požadovaných zdvihových závislostí. Tuto vlastnost komerčně dostupné řídicí jednotky nemají. Součástí řešení je i návrh a praktické ověření metody pro odměření referenční polohy mechanismu, která nevyžaduje žádný speciální snímač polohy. Spočívá v najetí na mechanický doraz se známou polohou a vyhodnocení stavu, kdy se měřená poloha přestane měnit.

Dynamické chování motoru bylo nejprve vyšetřováno při zatížení náhradním setrvačníkem. Byla provedena identifikace parametrů aproximačního modelu kmitavého lineárního systému 2. řádu, s cílem přibližně popsat vlastní kmity soustavy jako celku. Získaný model byl následně použit pro optimalizaci budicí funkce. Vzhledem k tomu, že aproximace nelineární soustavy lineárním modelem je velmi hrubá, byly optimální hodnoty jeho parametrů zkorigovány experimentálně. Přesto bylo v této fázi dosaženo velmi dobrých výsledků. Podařilo se optimalizovat budicí funkci tak, že amplitudy nežádoucích překmitů splnily stanovenou mez a požadované polohy byly dosaženy v definovaných časech. Rovněž synchronizace obou pohonů pracovala bezchybně.

Konečnou fází byly zkoušky na funkčním modelu šicího stroje. Byly použity budicí zdvihové funkce získané v předchozí fázi se setrvačníky, přičemž se předpokládalo, že bude nutné znovu provést identifikaci a optimalizaci budicích funkcí. Ukázalo se však, že až na zvýšení "skluzu" během zdvihu, který ale není sledovanou veličinou, jsou s původním nastavením odezvy vyhovující. K tlumení překmitů napomáhají pasivní odpory v kluzných ložiskách jehelní tyče. Závěrem bylo ověřeno předávání jehly mezi jehelními tyčemi, které v rozsahu používaných rychlostí stroje (162 – 250 cyklů/min) fungovalo zcela vyhovujícím způsobem. Tímto krokem bylo splněno zadání práce. Funkce šití ověřena být nemohla, jelikož na funkčním modelu stroje zatím chybí ostatní mechanismy, tj. posun látky a manipulace s nití.

Dosud nevyřešeným problémem zůstalo odměřování polohy s využitím vnitřního snímače krokového motoru. I když pro samotné řízení není zpětná vazba potřeba, bude v každém případě nezbytná pro kontrolu polohy během chodu stroje i pro navržený způsob odměřování referenční polohy. Ten byl navržen s předpokladem využít existující odměřování budiče krokového motoru a ušetřit tak za vyhrazený snímač polohy. Kvůli chybám v signálu polohy poskytovaném budičem motoru však muselo být odměřování nakonec řešeno externím IRC snímačem (úspěšně). Bude-li ze strany zadavatele zájem o popsanou variantu pohonu, bude prvním z dalších kroků konzultace s dodavatelem krokového motoru ohledně možných způsobů řešení tohoto problému.

Hlavním přínosem této práce je zjištění, že moderní krokové motory mohou při vhodném způsobu řízení zastat i úlohy, které jsou typické spíše pro dražší servomotory. Vzhledem k absenci zpětnovazebního řízení nelze sice očekávat takovou robustnost vůči změnám zátěže, jakou disponují klasické servopohony, konkrétně v textilním průmyslu to však nemusí být na závadu, protože stroje zpravidla pracují s předem známým zatížením, na které lze pohon nastavit. Dílčím výsledkem práce je metoda výpočtu a generování řídicích pulzů pro řízení pohybu krokového motoru s obecným průběhem zrychlení. Tato metoda umožňuje použít krokový motor i pro konstrukci dynamicky méně náročné elektronické vačky.

Literatura

- PEJCHAR, Karel. Analýza a optimalizace dynamického chování šicího stroje DECO 2000. Liberec, 2005. 80 s. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, Katedra textilních a jednoúčelových strojů.
- [2] BERAN, J., NĚMEČEK, P., PROCHÁZKA, V., ŽABKA, P., PEJCHAR, K. Nový pohon jehelních tyčí šicího stroje EBS MARK II.
 Liberec, 2009. 31 s. Výzkumná zpráva. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, Katedra textilních a jednoúčelových strojů.
- [3] Oriental Motor. Closed Loop Stepping Motor and Driver Package, AS & ASC series
 [online]. 2009 [cit. 2.5.2010]. Dostupné z WWW:
 http://www.orientalmotor.com/products/pdfs/2009-2010/C/usa_st_as.pdf.
- [4] Oriental Motor. αstep AS series operating manual [online].
 2008 [cit. 2.5.2010]. Dostupné z WWW: http://www.orientalmotor.com/products/pdfs/opmanuals/HM-40016-3E.pdf.
- [5] LARM. Inkrementální rotační snímače IRC 300 až 325, technická specifikace [online].
 2006 [cit. 2.5.2010]. Dostupné z WWW: http://www.larm.cz/CZ/katalogy/snimace/czIRC300-325.pdf.
- [6] Avago Technologies. HCTL2032, Data Sheet [online].
 2007 [cit. 2.5.2010]. Dostupné z WWW: http://www.avagotech.com/docs/AV02-0096EN.
- [7] Microchip. PIC18F4685, Data Sheet [online].
 2007 [cit. 2.5.2010]. Dostupné z WWW: http://www.microchip.com/PIC18F4685.
- [8] Microchip. MPLAB ICD 3 In-Circuit Debugger User's Guide [online].
 2008 [cit. 2.5.2010]. Dostupné z WWW: http://www.microchip.com/icd3.
- [9] Microchip. MPASM Reference Manual [online].
 2008 [cit. 2.5.2010]. Dostupné z WWW: http://www.microchip.com/mpasm.

- [10] MODRLÁK, Osvald. Analýza dynamických systémů, studijní materiály [online].
 2004 [cit. 2.5.2010]. Dostupné z: http://mono.rss.tul.cz/skola/pdf/tar1_ads.pdf.
- [11] MODRLÁK, Osvald. Úvod do identifikace, studijní materiály [online].
 2004 [cit. 2.5.2010]. Dostupné z: http://mono.rss.tul.cz/skola/pdf/tar1_zid.pdf.

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Systém řízení pohonu jehelních tyčí

PŘÍLOHY DIPLOMOVÉ PRÁCE

Seznam příloh diplomové práce

- $A V \acute{y}s ledky identifikace$
- ${\bf B}-{\bf V}$ ýsledky měření se setrvačníkem
- C Výsledky měření na funkčním modelu
- $\mathbf{D} \mathbf{Sch\acute{e}mata}$ zapojení
- E Software na CD

Příloha A

Výsledky identifikace modelu se setrvačníkem








Příloha B

Výsledky měření na modelu se setrvačníkem









Příloha C

Výsledky měření na funkčním modelu









Příloha D

Schéma zapojení řídicí jednotky





Příloha E

software na CD