

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice PhD Thesis, sv. 407

ISSN 1213-4198



Ing. Jiří Pulkrábek

Modelování dynamických vlastností vícemotorových pohonových soustav se sériově řazenými elektromotory

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta strojního inženýrství
Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Ing. Jiří Pulkrábek

**MODELOVÁNÍ DYNAMICKÝCH VLASTNOSTÍ
VÍCEMOTOROVÝCH POHONOVÝCH SOUSTAV SE SÉRIOVĚ
ŘAZENÝMI ELEKTROMOTORY**

**SIMULATION OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF MULTI-
MOTOR DRIVES WITH SERIAL ORDERING OF
ELECTROMOTORS**

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

Obor: Inženýrská mechanika
Školitel: prof. Ing. Ctirad Kratochvíl, DrSc.
Oponenti: doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.
doc. Ing. Jaroslav Kalous, CSc.
Ing. Milan Hortel, DrSc.

Datum obhajoby: 15. 3. 2007

KLÍČOVÁ SLOVA:

vícemotorová pohonová soustava, elektromotor, spojovací prvek, vůle

KEYWORDS:

multi-motor drive, electromotor, connection element, backlash

Disertační práce je uložena na oddělení vědy a výzkumu
Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně, Technická 2, 61669 Brno

OBSAH

obsah	3
1 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A OZNAČENÍ	5
2 ÚVOD	6
2.1 Přehled o stavu řešené problematiky	6
2.2 Cíle a hlavní přínos práce	7
3 MODEL POHONOVÉ SOUSTAVY	8
4 CHOVÁNÍ SOUSTAVY V PŘÍPADĚ ROZDÍLNÝCH CHARAKTERISTIK ELEKTROMOTORŮ	10
4.1 Rozdílné momenty setrvačnosti elektromotorů	10
4.2 Rozdílné konstanty magnetického toku elektromotorů	12
4.3 Rozdílné odpory vinutí elektromotorů	15
4.4 Rozdílná indukčnost vinutí elektromotorů	17
5 VLIV VLASTNOSTÍ SPOJOVACÍCH PRVKŮ NA CHOVÁNÍ POHONOVÉ SOUSTAVY	18
5.1 Vliv tvaru charakteristiky spojovacích prvků	18
5.2 Vliv vůle ve spojovacích prvcích	19
6 ZÁVĚR	22
6.1 Přínosy	22
6.2 Výhledy	23
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	25
AUTOROVO CURRICULUM VITAE	27
SEZNAM PUBLIKACÍ	28
ABSTRACT	29

1 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A OZNAČENÍ

b_i	.....	tlumení ve spojovacím prvku
$c\varnothing_i$	.....	konstanta magnetického toku
J_i	.....	moment setrvačnosti elektromotoru
k_i	.....	tuhost spojovacího prvku
L_i	.....	indukčnost obvodu kotvy
M_N	.....	zatěžující moment při nominální úhlové rychlosti ω_N
M_T	.....	moment tření v klidu
$m_z(t)$	.....	aktivní zatěžovací moment
M_z	.....	zatěžovací moment
R_i	.....	odpor obvodu kotvy
X	.....	exponent určující mechanickou charakteristiku zatížení
Δ_{ij}	.....	přírůstek úhlového natočení
ω_i	.....	úhlová rychlost rotoru
J_i	.....	moment setrvačnosti pracovního stroje
φ_i	.....	úhlová výchylka
M_i	.....	hnací moment elektromotoru
$\dot{\Delta}_{ij}$	.....	přírůstek úhlové rychlosti
I_i	.....	proud obvodu kotvy
U_i	.....	budící napětí

2 ÚVOD

2.1 PŘEHLED O STAVU ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Vícemotorové pohonové soustavy jsou zpravidla používány v průmyslových odvětvích, jako je papírenský průmysl, textilní průmysl, hutnictví železa a barevných kovů atd. V posledních letech však došlo ke značné miniaturizaci elektromotorů za současného navýšení jejich výkonů, což umožňuje jejich využití například v různých mechatronických aplikacích, kybernetice atd.

Vícemotorové elektromechanické pohonové soustavy se od jednomotorových liší tím, že celkový hnací moment zabezpečuje pro celý systém několik motorů, které jsou mezi sebou spojeny především mechanicky, v řadě případů i elektricky. Podle typu mechanické vazby mezi motory rozlišujeme následující druhy vícemotorových pohonů:

- Pohony s tuhou mechanickou vazbou, tj. takové pohony, kde jsou hřídele všech hnacích motorů mezi sebou spojeny dostatečně tuhými spojovacími členy,
- pohony s pružnou mechanickou vazbou, tj. pohony, v nichž vazební členy mezi jednotlivými pohony jsou pružné,
- pohony se smíšenými mechanickými vazbami, tj. pohony s vazbami tuhými i pružnými.

Vícemotorové elektromechanické pohonové soustavy vykazují ve srovnání se systémy jednomotorovými řadu předností, z nichž uvedme následující:

- Rozsáhlé možnosti regulace rychlostí a hnacích momentů motorů podle požadavků technologického, či jiného pracovního procesu,
- větší výkonová rezerva a tím i vyšší provozní spolehlivost,
- zlepšení dynamických vlastností pohonového systému, vyplývající ze zmenšení celkového hmotného momentu setrvačnosti motorů při stejném celkovém výkonu soustavy,
- možnost projektování a konstruování vysoce výkonných pohonových systémů s použitím sériově vyráběných motorů s relativně malými výkony,
- často výhodnější konstrukční řešení z hlediska umístění hnacích motorů, dané menšími rozměry a hmotnostmi motorů, což se může projevit v úspoře konstrukčních materiálů pro samotné stroje, i pro jejich stavební základy.

Na druhé straně se však u vícemotorových elektromechanických pohonových soustav objevuje nebezpečí vzniku velice složitých kmitavých dějů, vyplývajících například z rozdílnosti charakteristik motorů (i stejného typu), které mohou mít za následek:

- Přerozdělování celkového zatížení mezi jednotlivé motory i další části pohonového systému, což může vyústit až v jejich přetěžování a

- nesoulad úhlových rychlostí jednotlivých hnacích motorů v systému, což vyvolává zejména problémy při regulaci rychlosti a polohy pracovních orgánů stroje.

Problematika vícemotorových pohonových soustav je v literatuře zřídka zmiňována. Obecně na toto téma nevzniklo mnoho prací. Více prostoru je tomuto problému věnováno v práci J. Kalouse [1]. Pozornost je zde věnována především dvumotorovým pohonovým soustavám v kterých jsou elektromotory uspořádány sériově, nebo paralelně. Pro každé zapojení jsou vytvořena bloková schémata s vyjádřením jednotlivých přenosů a jsou učiněny závěry týkající se chování a stability soustav.

V [8] je popsán algoritmus pro synchronní řízení vícemotorových pohonových soustav. V mnoha případech výrobních linek je zpravidla požadováno vhodné řízení vícemotorové pohonové soustavy, která tuto linku pohání. Z technologických důvodů je často nezbytné udržovat přesnou synchronizaci hlavních řízených veličin, jako jsou poloha, rychlost a zrychlení. Práce popisuje obecný řídicí algoritmus pro vícemotorové pohonové soustavy, který poskytuje možnost přesně dodržovat synchronizaci příslušných proměnných.

V článku [9] se autoři zabývají samosynchronizací vícemotorové soustavy vibračního dopravníku. Díky použití více motorů se lze vyhnout nevýhodám platným pro jednomotorové vibrační stroje, jako je limitovaná excentrická síla a výkon. Vícemotorové vibrační dopravníky nacházejí široké uplatnění v oblasti velkých vibračních strojů v průmyslových odvětvích jako metalurgie, doprava uhlí a pod. Protože počet použitých motorů je často větší než dva, je analýza dynamického chování vícemotorových dopravníků velmi komplexní problematikou.

Novým přístupem k řešení vektorového řízení vícefázových, vícemotorových, pohonových soustav se zabývají články [10] a [11].

Články [12] a [13] se zabývají dynamickým chováním soustavy obsahující synchronní generátory, indukční motory a sériové kondenzátory. Je zde posuzována stabilita soustavy a její přechodové stavy, pro různá nastavení soustavy.

2.2 CÍLE A HLAVNÍ PŘÍNOS PRÁCE

Cílem disertační práce je vytvoření počítačového modelu vícemotorové pohonové soustavy se sériově řazenými elektromotory a posouzení jejího chování při změně parametrů jednotlivých členů soustavy.

Soustava se skládá z jednotlivých elektromotorů, pracovního stroje, spojovacích prvků a řídicí subsoustavy. Charakteristiky jednotlivých členů mohou nabývat mnoha hodnot, nebo mít různé průběhy. Ideální vícemotorová soustava má oba elektromotory naprosto shodné. To je však v praxi nedosažitelné, z důvodu výrobních nepřesností, ke kterým dochází při výrobě a montáži elektromotorů. Hlavním cílem je tedy posouzení vlivu rozdílnosti v charakteristikách jednotlivých elektromotorů na chování soustavy. K podobným neshodám v charakteristikách

může docházet i v případě spojovacích prvků, kdy mohou být použity i zcela odlišné typy spojovacích prvků.

Cíle práce tedy můžeme shrnout následovně:

- posouzení vlivu rozdílnosti v charakteristikách jednotlivých elektromotorů na chování soustavy
- posouzení vlivu rozdílnosti v charakteristikách jednotlivých spojovacích prvků na chování soustavy

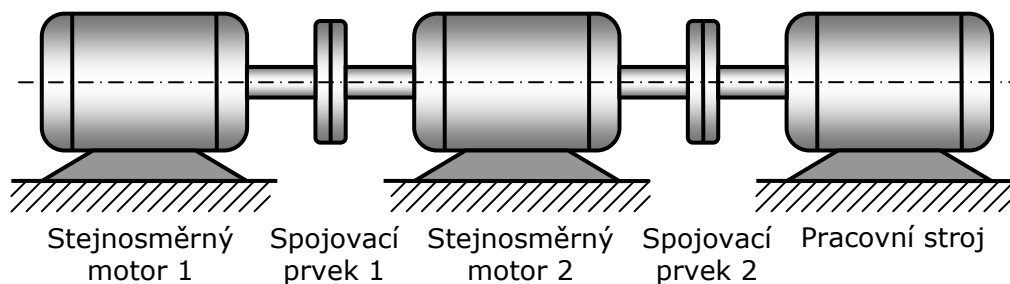
Řešení dané problematiky je prováděno v softwarovém prostředí programu MATLAB.

Hlavní přínos práce lze spatřovat v hlubším porozumění vlivu rozdílnosti jednotlivých charakteristik členů pohonové soustavy na její chování, což může vést k odstranění problémů vznikajících při provozu vícemotorových pohonových soustav již ve fázi návrhu dané pohonové soustavy.

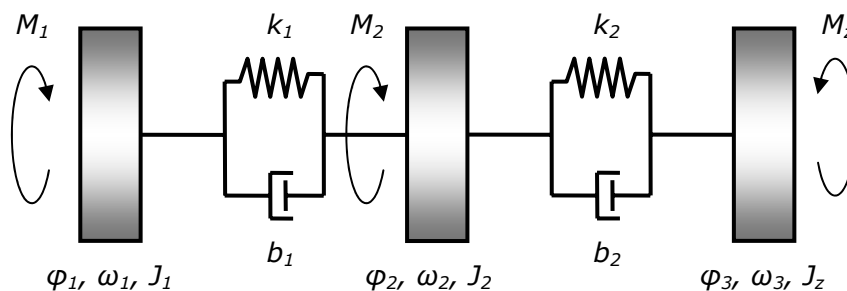
3 MODEL POHONOVÉ SOUSTAVY

Základní schéma vícemotorové pohonové soustavy se sériově řazenými elektromotory je znázorněno na obr. 1. Jedná se o dva do série zapojené stejnosměrné elektromotory s permanentními magnety. Elektromotory a pracovní stroj jsou vzájemně propojeny spojovacími prvky.

Elektromotory jsou uvažovány jako absolutně tuhé členy, spojovací prvky jsou pružné, definované svojí tuhostí a tlumením viz. obr. 2.



Obr. 1 Základní schéma pohonové soustavy



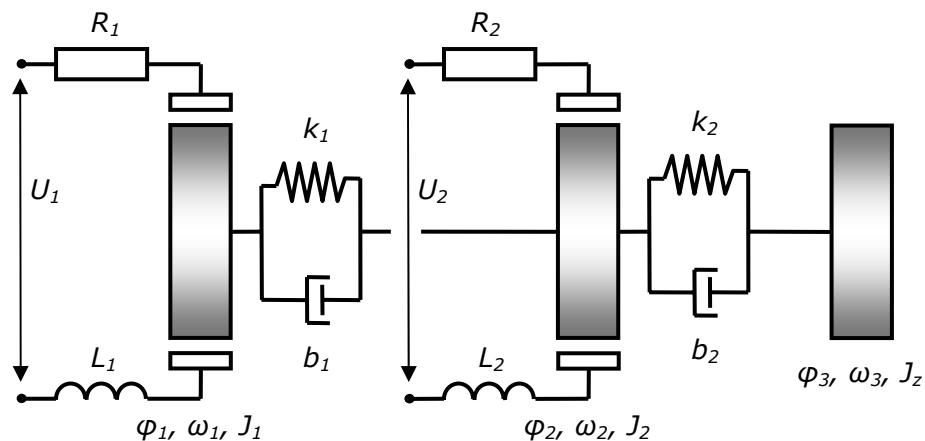
Obr. 2 Rozšířené schéma pohonové soustavy

$$J_1 \frac{d\omega_1}{dt} + \frac{1}{2} \frac{dJ_1}{d\varphi_1} \omega_1^2 = M_1 - k_1(\Delta_{12}) - b_1(\dot{\Delta}_{12}) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} J_2 \frac{d(\omega_1 + \dot{\Delta}_{12})}{dt} + \frac{1}{2} \frac{dJ_2}{d(\varphi_1 + \Delta_{12})} (\omega_1 + \dot{\Delta}_{12})^2 = \\ = M_2 + k_1(\Delta_{12}) + b_1(\dot{\Delta}_{12}) - k_2(\Delta_{23}) - b_2(\dot{\Delta}_{23}) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} J_z \frac{d(\omega_1 + \dot{\Delta}_{12} + \dot{\Delta}_{23})}{dt} + \frac{1}{2} \frac{dJ_z}{d(\varphi_1 + \Delta_{12} + \Delta_{23})} (\omega_1 + \dot{\Delta}_{12} + \dot{\Delta}_{23})^2 = \\ = -M_T - (M_N - M_T) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_N} \right)^X - m_z(t) + k_2(\Delta_{23}) + b_2(\dot{\Delta}_{23}) \end{aligned} \quad (3)$$

Rovnice (1), (2) a (3) popisují dynamické chování soustavy. Dále je potřeba sestavit rovnice, popisující její chování z pohledu elektrotechniky. K tomu je potřeba vytvořit rozšířené schéma soustavy na obr. 2, viz. obr. 3.



Obr. 3 Rozšířené schéma pohonové soustavy s elektrickými prvky

Na základě tohoto schématu můžeme sestavit následující rovnice pro motor 1 a motor 2

$$U_1 = R_1 I_1 + L_1 \frac{dI_1}{dt} + c_1 \phi_1 \omega_1 \quad (4)$$

$$U_2 = R_2 I_2 + L_2 \frac{dI_2}{dt} + c_2 \phi_2 (\omega_1 + \dot{\Delta}_{12}) \quad (5)$$

Rovnice (1), (2), (3), (4) a (5) popisují chování dvoumotorové pohonové soustavy se sériově řazenými elektromotory s permanentními magnety. Řešením těchto rovnic lze získat průběhy následujících veličin

Δ_{12}	.....	přírůstek úhlového natočení na spojovacím prvku 1
Δ_{23}	.....	přírůstek úhlového natočení na spojovacím prvku 2
ω_1	.....	úhlová rychlost rotoru elektromotoru 1
I_1	.....	proud na kotvě elektromotoru 1
I_2	.....	proud na kotvě elektromotoru 2

Spojovací prvky jsou uvažovány s disipací energie, tj. je uvažováno tlumení.

4 CHOVÁNÍ SOUSTAVY V PŘÍPADĚ ROZDÍLNÝCH CHARAKTERISTIK ELEKTROMOTORŮ

4.1 ROZDÍLNÉ MOMENTY SETRVAČNOSTI ELEKTROMOTORŮ

Vlivem výrobních nepřesností může dojít k tomu, že i dva elektromotory stejného typu mohou mít různé momenty setrvačnosti. Tyto odchylky samozřejmě v praxi nenabývají příliš velkých hodnot. Vzhledem k tomu, že je cílem této práce posoudit kvalitativní vliv rozdílnosti jednotlivých charakteristik na chování pohonové soustavy, bude rozdíl v momentech setrvačnosti z důvodu jasného posouzení volen výrazně větší, než by tomu bylo u reálných elektromotorů. Vliv rozdílných momentů setrvačnosti elektromotorů bude popsán na případě většího momentu setrvačnosti elektromotoru 1 ve srovnání se soustavou se shodnými vlastnostmi elektromotorů.

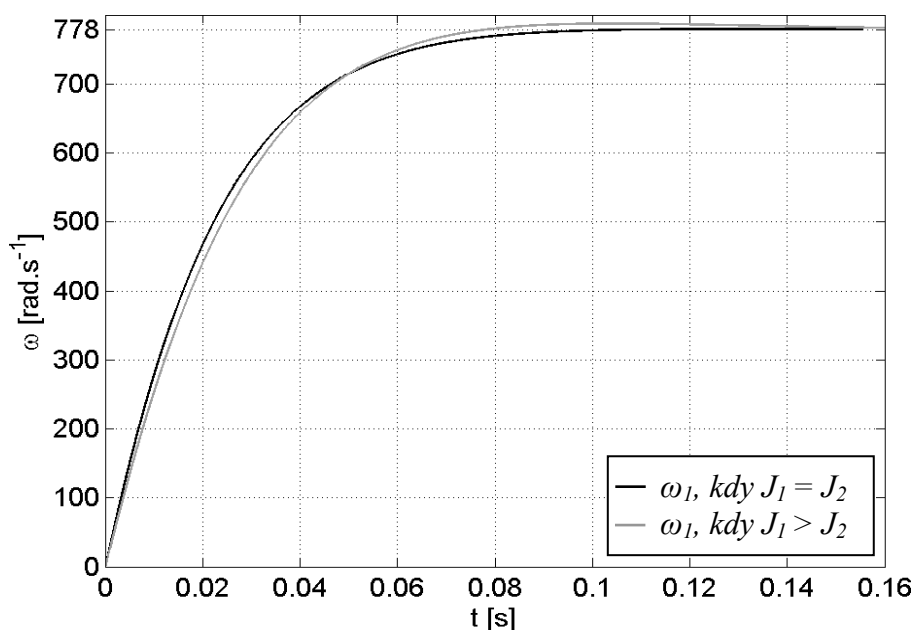
$$J_1 > J_2, \text{ kdy } J_1 = 6,170 [\text{g.cm}^2], J_2 = 4,110 [\text{g.cm}^2]$$

Na obrázcích 4-6 jsou zobrazeny charakteristiky pohonové soustavy v případě většího momentu setrvačnosti elektromotoru 1, ve srovnání s pohonovou soustavou se shodnými elektromotory. Velikost úhlové rychlosti a proudu na kotvách elektromotorů je téměř shodná pro oba elektromotory, což je dáno dostatečnou tuhostí spojovacího prvku mezi těmito elektromotory a shodnými elektrickými charakteristikami motorů..

Vlivem celkového navýšení momentu setrvačnosti pohonové soustavy dochází k pomalejšímu najetí na požadovanou úhlovou rychlost v přechodové oblasti, avšak k výraznějšímu překmitu v intervalu ustálení. Což způsobí právě vyšší celkový moment setrvačnosti pohonové soustavy při zachování stejného nastavení PI regulátoru ve srovnání s pohonovou soustavou se shodnými charakteristikami, viz. obr. 4.

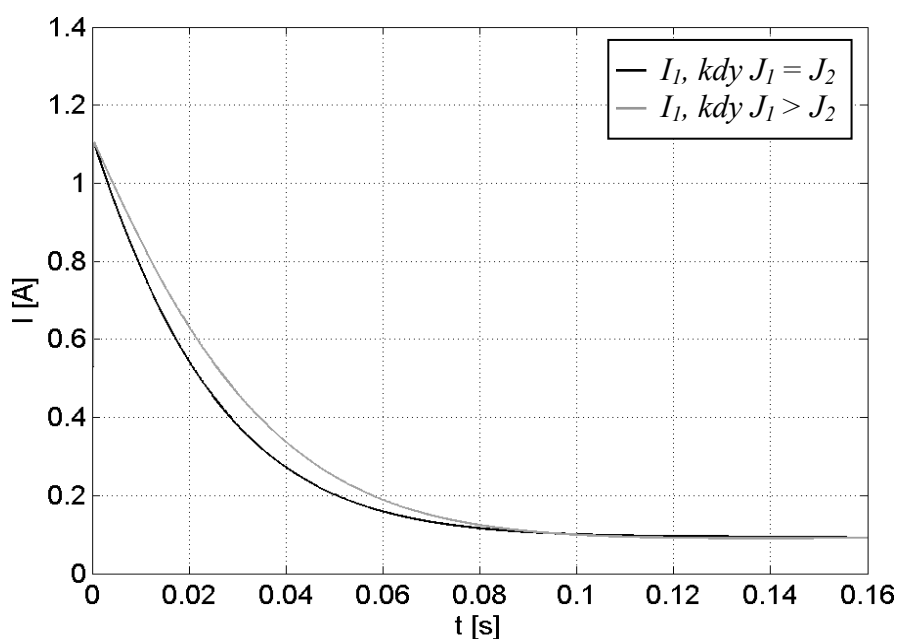
Vlivem zvýšení celkového momentu setrvačnosti dochází ke zvýšení hodnoty indukovaného proudu na kotvách elektromotorů v oblasti najetí elektromotorů na požadovanou úhlovou rychlost, což je způsobeno potřebou většího hnacího momentu soustavy pro najetí na požadovanou úhlovou rychlost, viz. obr. 5.

V ustáleném provozu je již průběh pro případ pohonové soustavy s rozdílnými a se shodnými charakteristikami totožný.

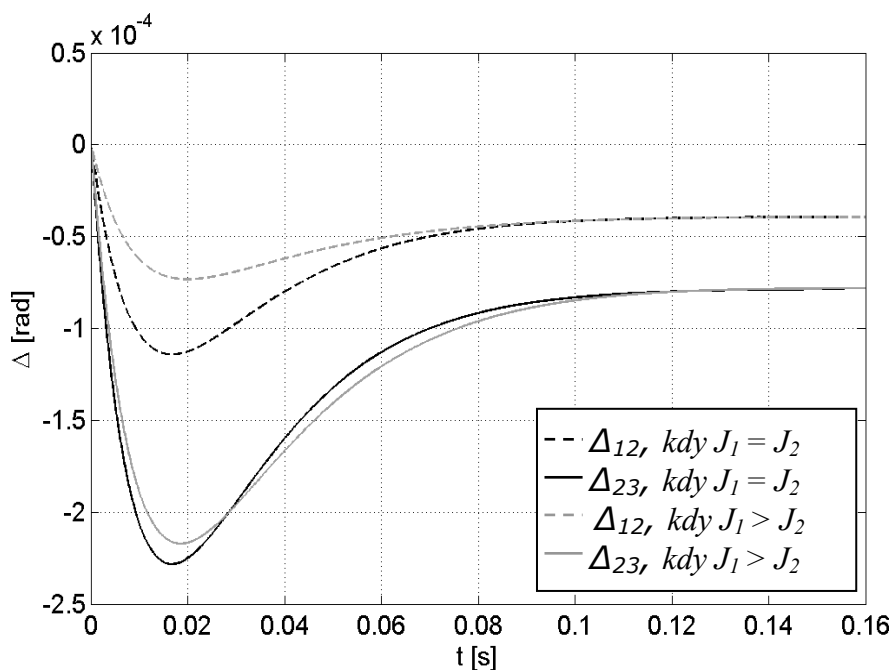


Obr. 4 Úhlová rychlost elektromotoru 1

Přírůstek úhlového natočení na spojovacím prvku 1 dosahuje vlivem horšího poměru hnacího momentu ku momentu setrvačnosti menších hodnot. Zpomalení najetí celé soustavy na požadované otáčky způsobí také zmenšení přírůstku úhlového natočení na spojovacím prvku 2. Z obr. 6 je vidět, že přírůstky úhlového natočení na spojovacích prvcích nabývají svých maxim později. V ustáleném stavu jsou hodnoty výchylek shodné s případem pohonové soustavy se shodnými charakteristikami.



Obr. 5 Proud na kotvě elektromotoru 1



Obr. 6 Přírůstky úhlového natočení na spojovacích prvcích

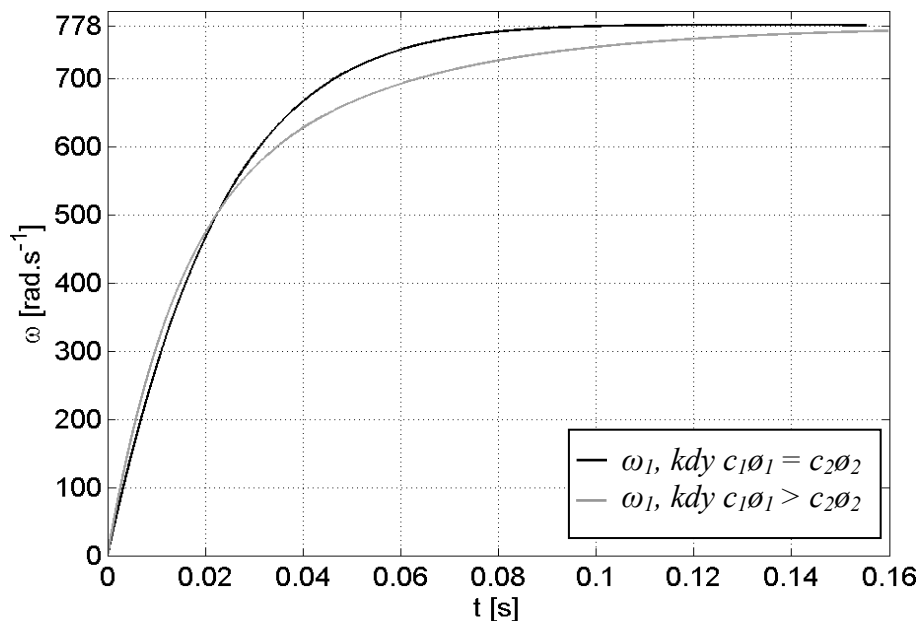
4.2 ROZDÍLNÉ KONSTANTY MAGNETICKÉHO TOKU ELEKTROMOTORŮ

Zde se jedná o rozdílný magnetický tok v mezeře mezi rotorem a statorem sledovaných elektromotorů. Vzhledem k použití stejnosměrných elektromotorů s permanentními magnety, může být způsoben rozdíl v hodnotách magnetického toku mechanicky, nebo vlivem rozdílů v použitých magnetech. K této odchylce může dojít výrobními odchylkami jednotlivých komponent, montážními nepřesnostmi, defektem, nebo výrobní technologií. V praxi jsou tyto odchylky u stejných typů elektromotorů minimální. Vliv rozdílných konstant magnetického toku elektromotorů bude popsán na případu větší konstanty magnetického toku elektromotoru 1 ve srovnání se soustavou se shodnými vlastnostmi elektromotorů.

$$c_{1\theta_1} > c_{2\theta_2}, \text{ kdy } c_{1\theta_1} = 31,8 \text{ [mNm/A]}, c_{2\theta_2} = 21,2 \text{ [mNm/A]}$$

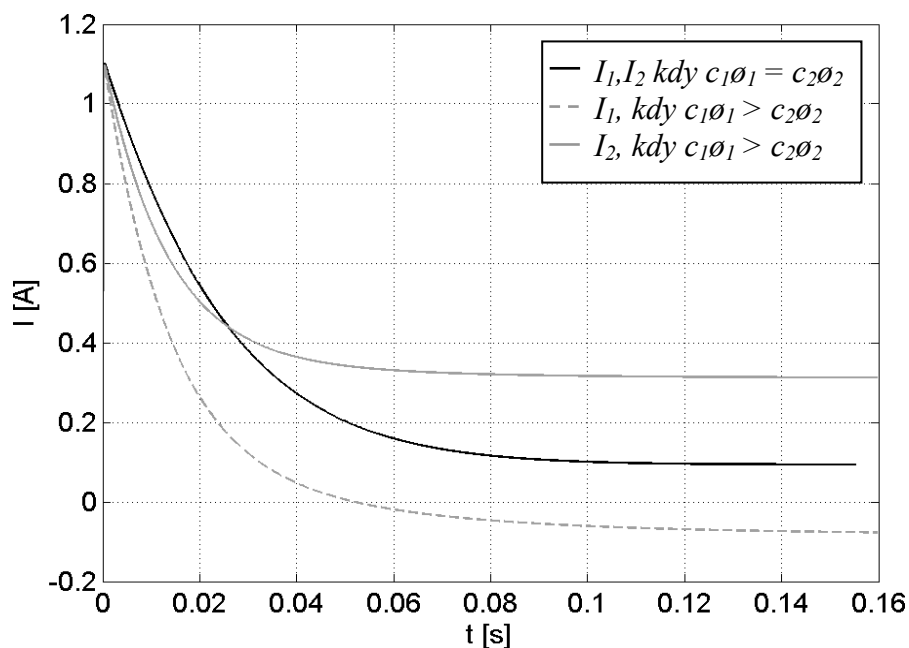
Průběh úhlové rychlosti je znázorněn na obr. 7. Náběh na požadovanou úhlovou rychlost je v porovnání se soustavou se shodnými elektromotory pozvolnější. Rychlost dosažení požadované úhlové rychlosti je možné upravit nastavením PI regulátoru. Je však potřeba brát v ohled maximální špičkovou hodnotu proudu, které jsou elektromotory schopny snést.

Oba elektromotory mají až na malý rozdíl způsobený přírůstkem úhlového natočení na spojovacím prvku 1 téměř stejnou úhlovou rychlost. S růstem úhlové rychlosti elektromotorů klesá velikost indukovaného proudu, kdy u elektromotoru 1 je tento pokles díky větší konstantě magnetického toku rychlejší, viz. obr. 8.



Obr. 7 Úhlová rychlost elektromotoru 1

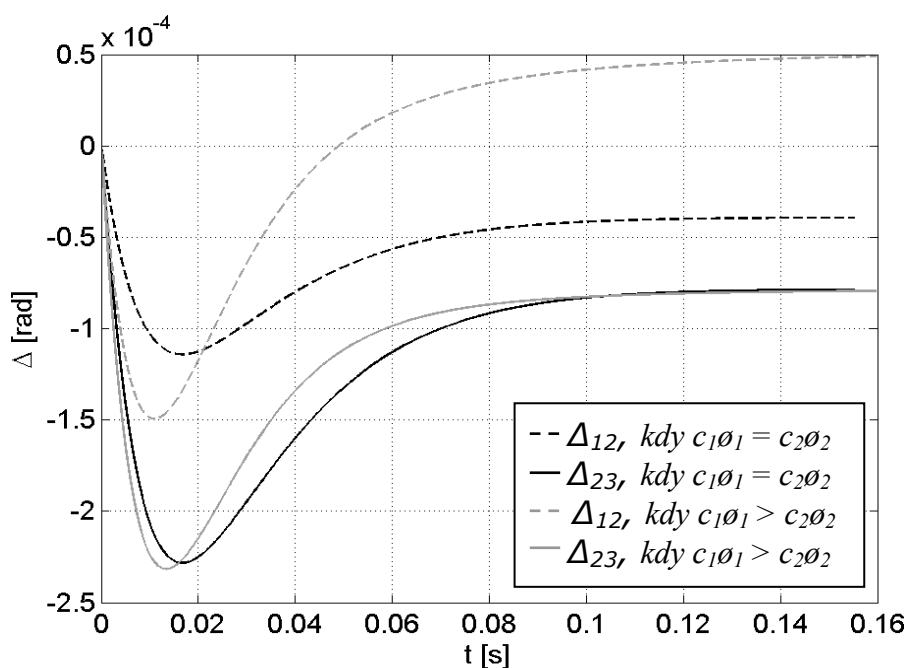
Snížení velikosti indukovaného proudu je ve srovnání se soustavou se shodnými elektromotory rychlejší a hodnota indukovaného proudu v ustálené oblasti je nižší. Průběh indukovaného proudu na kotvě elektromotoru 1 udává společně s hodnotou konstanty magnetického toku velikost hnacího momentu, viz. obr. 10. Pokles proudu elektromotoru 1 musí vyrovnat elektromotor 2 nárůstem svého řídicího napětí, a tedy proudu v ustálené oblasti, což současně vede ke zvýšení jeho hnacího momentu.



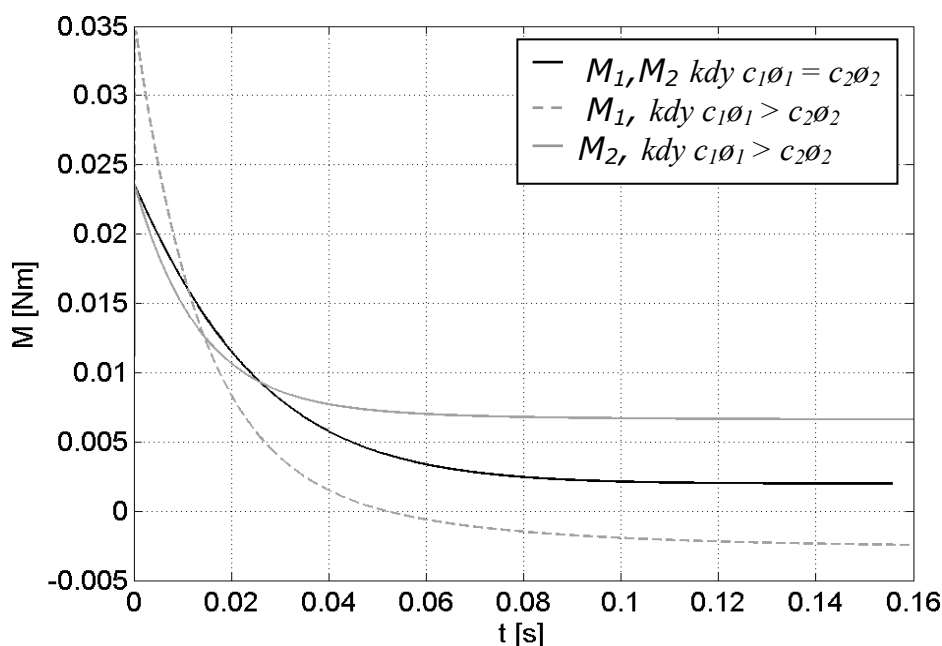
Obr. 8 Proud na kotvě elektromotoru 1

Čistě teoreticky se může chování soustavy dostat až do situace znázorněné na obr. 8, kdy se proud elektromotoru 1 dostane do záporných hodnot a elektromotor 1 začne mít opačný moment. Elektromotor 2 potom pohání celou soustavu a je prvním elektromotorem prakticky brzděn.

Přírůstek úhlového natočení na spojovacím prvku 1 dosáhne díky vyšší hodnotě hnacího momentu po startu, způsobené vyšší hodnotou konstanty magnetického toku, v přechodové oblasti větších hodnot, viz. obr. 9. S růstem otáček, klesající hodnotou indukovaného proudu a se zmenšujícím se hnacím momentem se přírůstek úhlového natočení dostává do hodnot kladných. V ustáleném stavu je tedy jeho velikost odlišná od případu se symetrickými charakteristikami. Změna velikosti magnetického toku ovlivňuje chování v přechodové i v ustálené oblasti. Přírůstek na spojovacím prvku 2 dosáhne v přechodové oblasti nepatrně vyšších hodnot. Výrazný je posun maximálních hodnot přírůstků v přechodové oblasti doleva, čemuž odpovídá i rychlejší nárůst úhlové rychlosti v její přechodové části díky vyššímu celkovému momentu elektromotorů v okamžiku startu. Přírůstek na spojovacím prvku 2 se ustálí na stejné hodnotě, jako v případě stejných charakteristik elektromotorů, vzhledem ke konstantní hodnotě zatěžovacího momentu, kdy spojovací prvek 2 přenáší stejný moment v případě totožných i rozdílných charakteristik elektromotorů.



Obr. 9 Přírůstky úhlového natočení na spojovacích prvcích



Obr. 10 Hnací momenty elektromotorů

4.3 ROZDÍLNÉ ODPORY VINUTÍ ELEKTROMOTORŮ

Vliv rozdílného vinutí elektromotoru bude popsán na případě většího odporu vinutí elektromotoru 1 ve srovnání se soustavou se shodnými vlastnostmi elektromotorů.

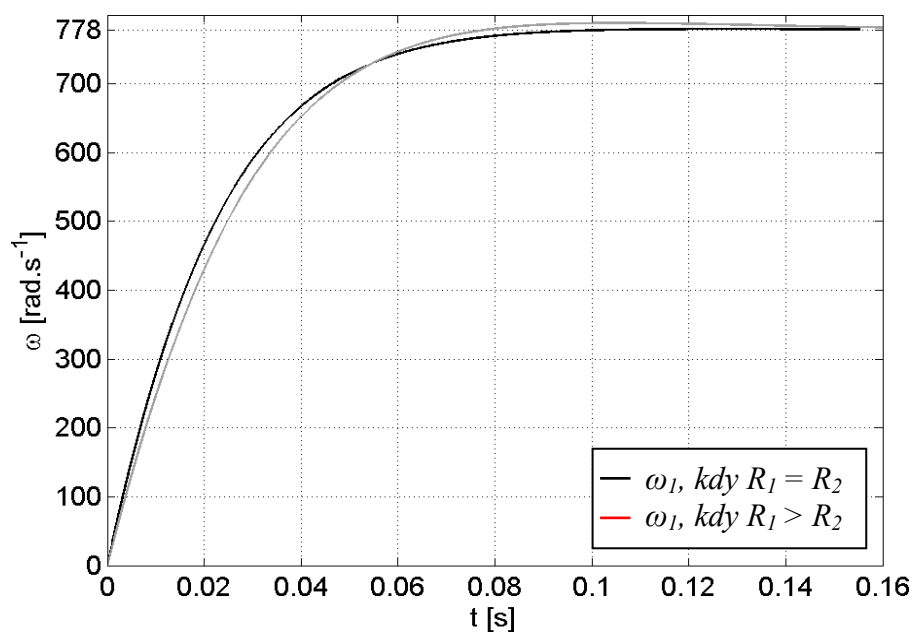
$$R_1 > R_2, \text{ kdy } R_1 = 31,5 [\Omega], R_2 = 21 [\Omega]$$

Zvýšení odporu vinutí rotoru elektromotoru 1 se projeví na úhlové rychlosti elektromotorů zpomalením náběhu na požadovanou úhlovou rychlost v počátku a mírným překmitem na konci přechodové části charakteristiky, viz. obr. 11. Nastavení PI regulátoru je stejné jako v případě soustavy se shodnými charakteristikami a překmit, či rychlost najetí by bylo možné upravit vhodným přenastavením tohoto regulátoru.

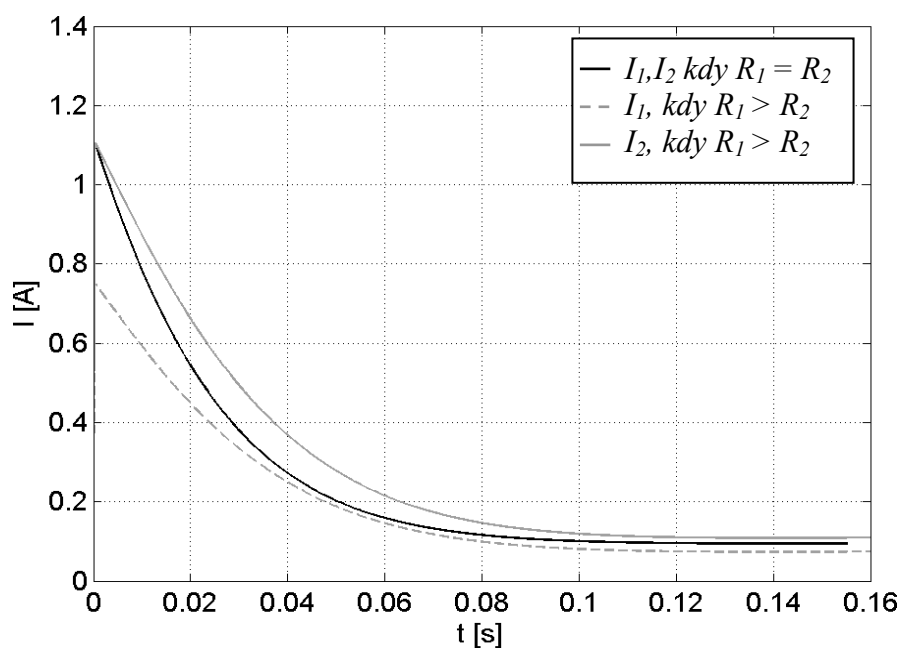
Jak je zřejmé z rovnic (4) a (5), projeví se zvýšení odporu vinutí rotoru prvního elektromotoru snížením jeho indukovaného proudu, viz. obr. 12. Touto změnou se sníží jak startovací proud, tak proud v ustáleném stavu. Z potřeby zachovat stálý hnací moment elektromotorů dojde ke zvýšení indukovaného proudu ve vinutí elektromotoru 2.

Snížením startovacího proudu elektromotoru 1 se sníží také jeho rozběhový hnací moment, což se projeví zmenšením přírůstku úhlového natočení na spojovacím prvku 1, viz. obr. 13. Tento přírůstek je díky menšímu indukovanému proudu v kotvě elektromotoru, a tedy jeho menšímu hnacímu momentu menší trvale, tedy i v ustálené oblasti. Díky celkově nižšímu rozběhovému hnacímu momentu celé soustavy je nižší také špičková hodnota přírůstku úhlového natočení na spojovacím prvku 2. Jeho hodnota je však díky navýšení indukovaného proudu na kotvě

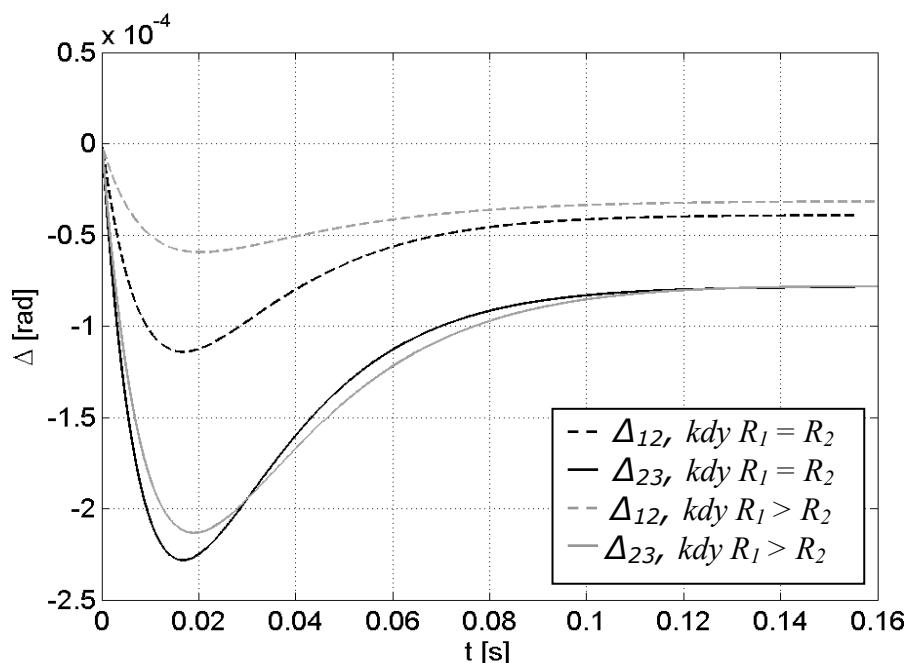
elektromotoru 2 v ustálené oblasti, a tedy navýšení hnacího momentu celé soustavy shodná, jako v případě stejných charakteristik elektromotorů.



Obr. 11 Úhlová rychlost elektromotoru 1



Obr. 12 Proud na kotvě elektromotoru 1



Obr. 13 Přírůstky úhlového natočení na spojovacích prvcích

4.4 ROZDÍLNÁ INDUKČNOST VINUTÍ ELEKTROMOTORŮ

Vliv rozdílu v indukčnosti vinutí elektromotorů je prakticky zanedbatelný vzhledem k tomu, že velikost členu $L_i \frac{dI_i}{dt}$ v rovnicích (4) a (5) dosahuje velmi malých hodnot, a proto nebude tomuto vlivu věnována větší pozornost. Jako ukázka vlivu tohoto členu bude dále popsán vliv rozdílných indukčností vinutí elektromotorů na případě o 50% větší indukčnosti elektromotoru 1, tj. $L_1 = 2,05 \text{ mH}$ a $L_2 = 1,37 \text{ mH}$.

Nárůst úhlové rychlosti je v přechodové oblasti v čase $t = 0,02 \text{ s}$ o $0,3 \text{ rad.s}^{-1}$ větší než v případě shodných elektromotorů a v okamžiku $t = 0,13 \text{ s}$ kdy se rychlost elektromotoru blíží požadované hodnotě 778 rad.s^{-1} je tato hodnota o $0,01 \text{ rad.s}^{-1}$ nižší.

V přechodové oblasti v čase $t = 0,02 \text{ s}$ je proud na kotvě elektromotoru 1 o cca $0,0003 \text{ A}$ vyšší, než je tomu v případě symetrických motorů, proud na kotvě elektromotoru 2 se již liší v řádu stotisícin. Podobně již není možné pozorovat rozdíl v ustálené oblasti.

Přírůstek úhlové výchylky na spojovacím prvku 1 dosahuje v místě své maximální hodnoty velikosti o $1 \times 10^{-7} \text{ rad}$ větší než v případě shodných charakteristik. Na spojovacím prvku 2 je tato hodnota $1,4 \times 10^{-7}$ větší.

Z předchozích výsledků vyplývá, že zde již nejsme schopni vyloučit chybu v přesnosti výpočtu a můžeme tedy konstatovat, že vliv rozdílu indukčností vinutí elektromotorů na chování soustavy je v rámci této práce při zvolené rozlišovací úrovni zanedbatelný.

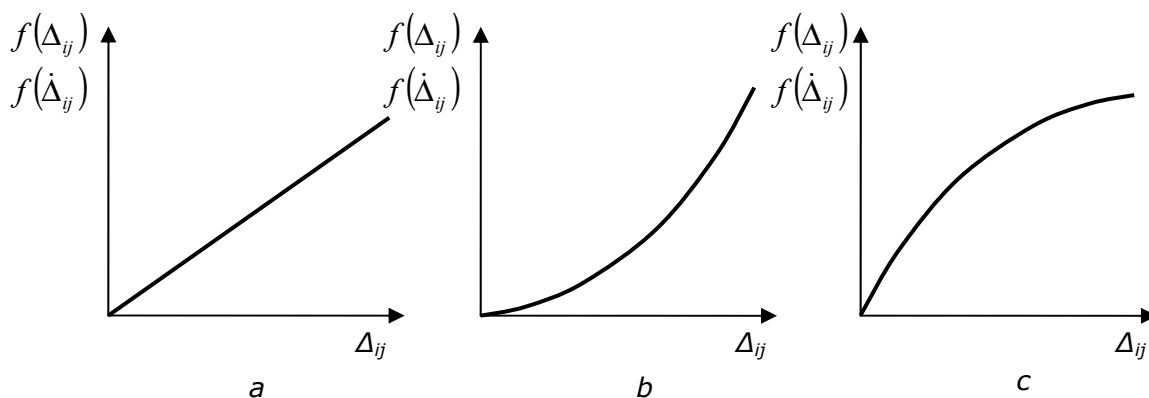
5 VLIV VLASTNOSTÍ SPOJOVACÍCH PRVKŮ NA CHOVÁNÍ POHONOVÉ SOUSTAVY

5.1 VLIV TVARU CHARAKTERISTIKY SPOJOVACÍCH PRVKŮ

Velikost torzních momentů od pružných vazeb lze obecně vyjádřit rovnicí

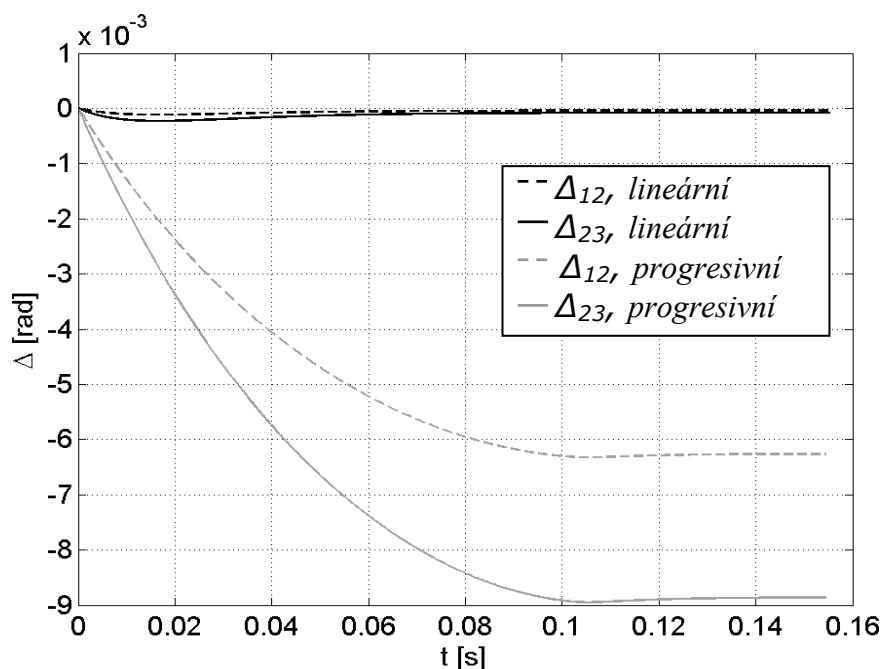
$$M_{pi} = f(\Delta_{ij}) + f(\dot{\Delta}_{ij}) \quad (111)$$

kde charakteristika spojovacích prvků může nabývat různých průběhů, viz. obr. 14.



Obr. 14 Některé z možných průběhů charakteristik spojovacích prvků

V této kapitole budou provedeny simulace chování pohonové soustavy se spojovacími prvky s nelineárně progresivními charakteristikami. Pro názornost vlivu vlastností spojovacích prvků bude tato analýza provedena pro soustavu se shodnými charakteristikami spojovacích prvků.



Obr. 15 Přírůstky úhlového natočení na spojovacích prvcích

Vliv tvaru charakteristiky spojovacích prvků se projeví především na průbězích přírůstků úhlového natočení na spojovacích prvcích. Přesto, že přírůstek zůstává pro posuzovanou soustavu a nastavení v řádově vyšších hodnotách, lze konstatovat, že vliv na průběh úhlových rychlostí a indukovaných proudů soustavy není výrazný. Jevšak vyšší, než je tomu v případě lineárních charakteristik spojovacích prvků.

Na obr. 15 je černě vyznačen průběh přírůstků úhlového natočení na spojovacích prvcích pro případ pohonové soustavy s lineární charakteristikou spojovacího prvku a červeně s nelineárně progresivní charakteristikou spojovacího prvku. Pokud se nezmění velikost hnacích momentů jednotlivých elektromotorů, nebo velikost zatěžovacího momentu, zůstává velikost torzních momentů na spojovacích prvcích stejná, stejně jako se nemění tuhost jednotlivých spojovacích prvků. Pro názornost je v odvození vynechán člen $f(\dot{\Delta}_i)$, který má na průběh charakteristiky spojovacího prvku velmi malý vliv. Můžeme tedy psát

$$\begin{aligned} M_{plin} &= M_{pprog} \\ k_i \Delta_{lin} &= k_i \Delta_{prog}^2 \end{aligned} \quad (6)$$

z čehož plyne

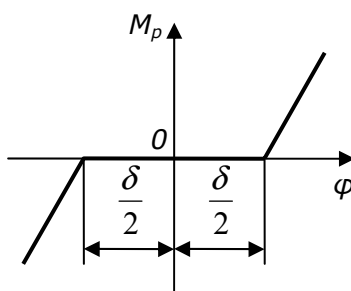
$$\Delta_{prog} = \sqrt{\Delta_{lin}} \quad (7)$$

Pokud má být rovnice (7) splněna, musí pro posuzovaný případ, kdy velikost přírůstku úhlového natočení pro spojovací prvek s lineární charakteristikou nabývá hodnot v řádech 10^{-4} , nabývat velikost přírůstku úhlového natočení na spojovacím prvku s nelineárně progresivní charakteristikou hodnot v řádech výrazně nižších.

Z obr. 14 je patrný zřetelný nárůst velikosti přírůstku úhlového natočení na spojovacích prvcích, plynulý a delší náběh na ustálenou hodnotu.

5.2 VLIV VŮLE VE SPOJOVACÍCH PRVCÍCH

Na chování pohonové soustavy má také vliv vůle ve spojovacích prvcích. Ta může nabývat u jednotlivých prvků rozdílných hodnot.

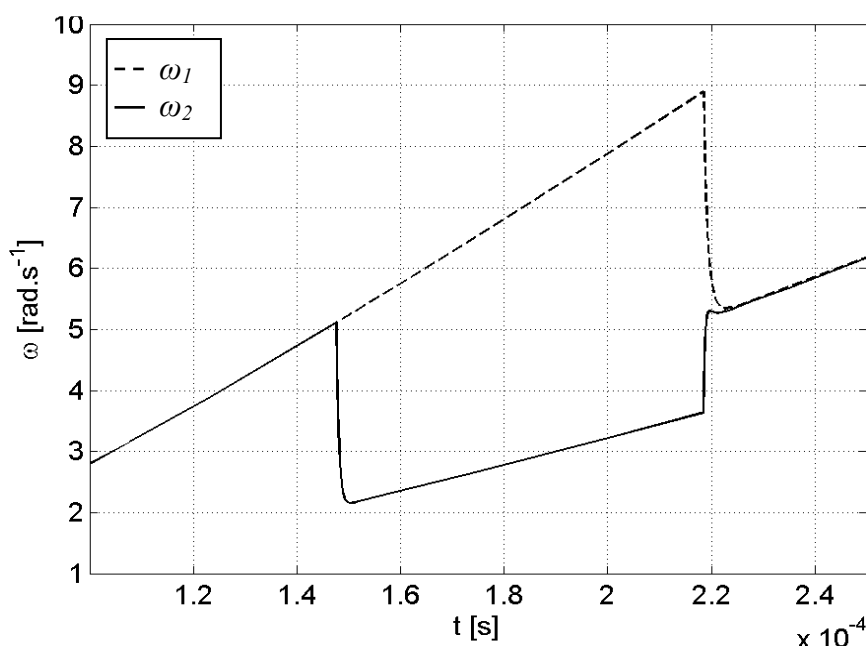


Obr. 18. Vůle ve spojovacích prvcích

Vůli lze obecně znázornit dle obr. 18. Je tedy definována tak, že dokud nedojde k vymezení této vůle, jsou torzní momenty na spojovacích prvcích rovny nule.

Shodná vůle na obou spojovacích prvcích

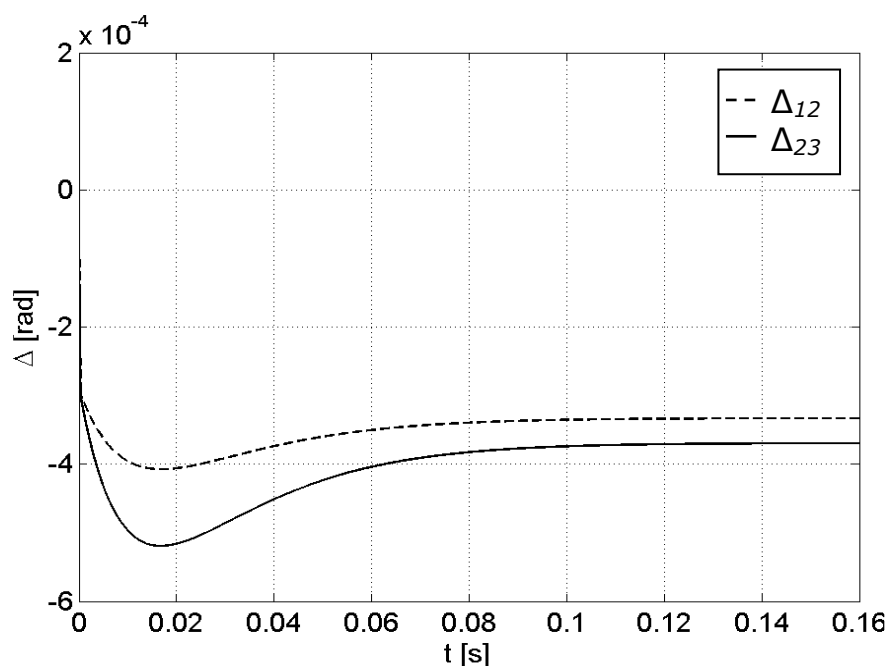
Detail oblasti nárůstu úhlové rychlosti ve které dochází k vymezení vůlí je na obr. 19. Z počátku je úhlová rychlost obou elektromotorů shodná. Nejdříve dojde k vymezení vůle na spojovacím prvku 2. V tomto okamžiku dojde ke skokovému poklesu úhlové rychlosti elektromotoru 2, který je nyní zatěžován zatěžovacím momentem pracovního stroje. Další nárůst úhlové rychlosti elektromotoru 2 je pozvolnější. V okamžiku vymezení vůle na spojovacím prvku 2 se začne vymezovat vůle na spojovacím prvku 1. Po její vymezení dojde ke skokovému snížení úhlové rychlosti elektromotoru 1, který je nyní zatěžován částí zatěžovacího momentu a ke skokovému zvýšení úhlové rychlosti elektromotoru 2 který je díky zapojení elektromotoru 1 odlehčen. Strmost růstu úhlové rychlosti po vymezení vůlí na spojovacích prvcích je nižší než v případě počátečního rozjezdu elektromotorů, avšak vyšší, než v případě úhlové rychlosti elektromotoru 2 po vymezení vůle na spojovacím prvku 2.



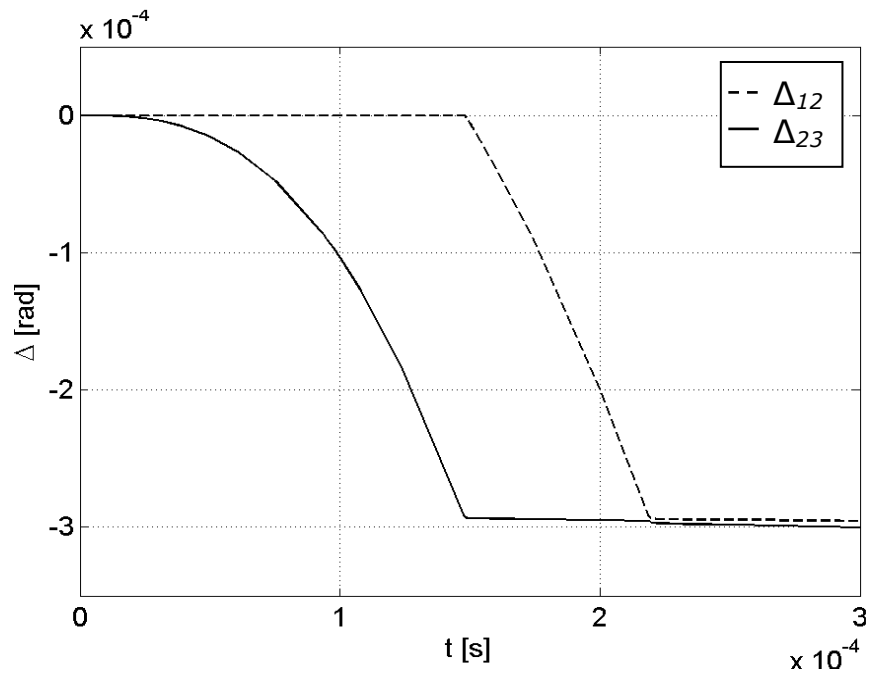
Obr. 19 Úhlové rychlosti elektromotorů - detail

Průběh přírůstků úhlového natočení je zobrazen na obr. 20. Detail průběhů, kdy dochází k vymezení vůlí je na obr. 21. Nejdříve dojde k rychlému nárůstu přírůstku úhlového natočení na spojovacím prvku 2. Přírůstek úhlového natočení na spojovacím prvku 1 je v tomto časovém intervalu nulový. Po vymezení vůle na spojovacím prvku 2 se přírůstek úhlového natočení na tomto prvku chová stejně jako by byl prvek bez vůle. V okamžiku vymezení vůle na spojovacím prvku 2 se začne vymezovat vůle na spojovacím prvku 1, což se projeví rychlým nárůstem přírůstku

úhlového natočení na tomto prvku. Po jejím vymezení dojde k mírnému skoku v hodnotě přírůstku úhlového natočení na spojovacím prvku 2. Přírůstek na spojovacím prvku 1 se dále chová jako v případě prvku bez vůle.



Obr. 20 Přírůstky úhlového natočení na spojovacích prvcích



Obr. 21 Přírůstky úhlového natočení na spojovacích prvcích - detail

6 ZÁVĚR

Cílem práce bylo vytvoření počítačového modelu pohonové soustavy dvumotorové pohonové soustavy se sériově řazenými elektromotory a provést na něm analýzu vlivu rozdílu charakteristik jednotlivých elektromotorů a vlastností spojovacích prvků na chování pohonové soustavy. Tento model byl vytvořen, jeho struktura a podrobnost odpovídá možnostem a rozsahu této disertační práce. Umožňuje jednoduché přidávání dalších prvků a modifikaci stávajících vlastností za účelem zvyšování komplexity modelu a tím do budoucna pokračování a nadstavbě započatého tématu.

V disertační práci je proveden podrobný postup odvození modelu pohonové soustavy. V rámci analýzy chování soustavy je posouzen vliv následujících prvků

- rozdílné momenty setrvačnosti elektromotorů
- rozdílné konstanty magnetického toku elektromotorů
- rozdílné odpory vinutí elektromotorů
- rozdílné indukčnosti vinutí elektromotorů
- rozdílné tvary charakteristik spojovacích prvků
- rozdílné tuhosti a tlumení spojovacích prvků
- vůle ve spojovacích prvcích

V práci jsou učiněny závěry o velikosti a významu vlivu zvolených odchylek ve srovnání se soustavou v ideálního stavu, tj. se soustavou se shodnými vlastnostmi elektromotorů a spojovacích prvků.

6.1 PŘÍNOSY

Tato práce vznikla za účelem posouzení vlivu rozdílností ve vlastnostech elektromotorů a spojovacích prvků na chování dvumotorové pohonové soustavy se sériově řazenými elektromotory. Přínosy práce v oblasti výzkumu dynamických vlastností pohonových soustav lze shrnout do následujících bodů:

- vytvořen základní model pro posuzování vlivu rozdílnosti charakteristik elektromotorů a spojovacích prvků na chování soustavy
- posouzen vliv rozdílnosti charakteristik jednotlivých elektromotorů na chování pohonové soustavy
- posouzen vliv rozdílnosti vlastností jednotlivých spojovacích prvků na chování pohonové soustavy

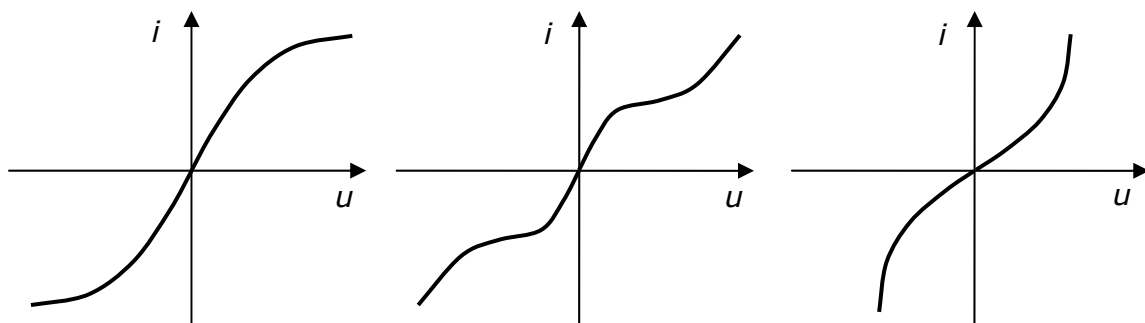
V oblasti pedagogické mohou být dosažené výsledky vodítkem při vytváření modelů složitých pohonových soustav a při navrhování simulačních experimentů na těchto modelech.

6.2 VÝHLEDY

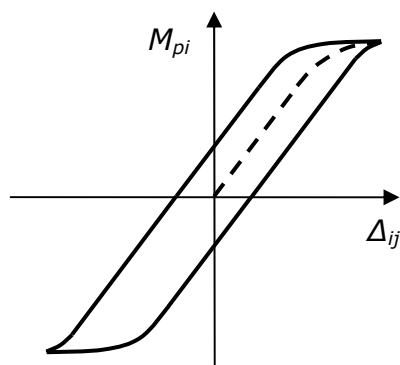
Práce tvoří základ pro další pokračování vědeckého výzkumu v oblasti problematiky vícemotorových pohonových soustav. Tato oblast je velmi rozsáhlá a zahrnuje vícemotorové soustavy se sériově řazenými elektromotory, paralelně řazenými elektromotory a kombinacemi předešlých dvou, a to v počtu elektromotorů od dvou až do libovolného množství.

V budoucnu je nezbytné uskutečnit experiment na modelové vícemotorové pohonové soustavě za účelem ověření správnosti dosažených, numericky získaných výsledků. Vzhledem k hodnotám simulovaným v této práci je potřeba dobře zvážit jak takovýto experiment provést. Zda je možné s dostatečnou přesností přímo, či nepřímo měřit některé ze sledovaných charakteristik soustavy, a to především přírůstky úhlového natočení na spojovacích prvcích. Tyto hodnoty by se získaly odečtením změřených úhlových rychlostí elektromotorů a pracovního stroje. Vzhledem k velikosti úhlových natočení spojovacích prvků získaných simulací by bylo potřeba měřit úhlové rychlosti velice přesně a vyloučit všechny možné chyby měření mající vliv na získání požadovaných hodnot, případně zvolit pohonovou soustavu s většími typy elektromotorů větších výkonů a spojovacími prvky s menší tuhostí. Zde by již bylo měření požadovaných veličin s dostatečnou přesností snažší, otázkou však zůstává finanční náročnost takovéhoho experimentu.

Jako pokračování práce doporučuji věnování se poruchové analýze za současného zvýšení komplexity modelu. Bylo by vhodné uvažovat nelineární prvky jako např. nelineární odpor vinutí elektromotorů, viz. [2], obr. 22, hystereze ve spojovacích prvcích, obr. 23. Zabývat se odlišnými metodami regulace, zhotovit model vícemotorové pohonové soustavy regulované pomocí pulzní šířkové modulace. Provést analýzu chování soustavy při reverzaci chodu elektromotorů a posouzení odezev na různé typy aktivních zatěžovacích momentů. Zpracovat modely vícemotorových soustav pro jiné než stejnosměrné elektromotory a porovnat výsledky jednotlivých soustav.



Obr. 22 Voltampérové charakteristiky nelineárních odporů



Obr. 23 Hysterezní smyčka

Problematikou poruch elektrických strojů se komplexně zabývá publikace [22]. Simulací vybraných poruch by bylo možné analyzovat jejich vliv na chování pohonové soustavy a simulovat tak některé z možných reálných havarijních stavů. Možných poruch je celá řada. Otázkou zůstává kterým poruchám se věnovat z pohledu realizovatelnosti. V úvahu přicházejí poruchy typu nadměrného oteplení motorů vlivem nevhodného umístění, nebo nefunkčního ventilátoru. Na toto téma již byly zpracovány studie v oblasti jednomotorových soustav. Široký záběr má problematika neklidného chodu a vibrací elektromotorů. Zde lze uvažovat příčiny od nevhodné montáže a zkroucení šasi motorů, přes chybné ustavení spojek a nevyváženost rotoru po magnetické nesouměrnosti dané například nerovnoměrností vzduchové mezery. Lze zvážit, zda je vhodné a možné provést kvalitní analýzu vlivu nekonstantního momentu setrvačnosti rotorů elektromotorů na chování vícemotorové pohonové soustavy.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KALOUS, J.: Přenosy a modelování elektromechanických pohonových soustav, Habilitační práce na Vojenské akademii v Brně na Fakultě elektrotechnické a stavební, Brno, 1992,
- [2] PROCHÁZKA, F., KRATOCHVÍL, C.: Úvod do matematického modelování pohonových soustav, 1. vydání, Akademické nakladatelství CERM, Brno, 2002, ISBN 80-7204-256-4
- [3] STRADIOT, J., et al.: Dynamika strojov, 1. vydání, Vydavateľ'stvo Alfa, Bratislava, 1991, ISBN 80-05-00756-6
- [4] SZKLARSKI, L., JARACZ, K., HORODECKI, A.: Electric Drive Systems Dynamics: Selected Problems, PWN-Polish Scientific Publishers, Warszawa, 1990, ISBN 83-01-08584-3
- [5] KALOUS, J.: Modelování systémů řízení, Kandidátská disertační práce na Vojenské akademii v Brně, Brno, 1991
- [6] ONDRÁČEK, E., JANÍČEK, P.: Výpočtové modely v technické praxi, 1. vydání, SNTL, Praha, 1990, ISBN 80-03-00458-6
- [7] KULE, L., et al.: Technika elektrických pohonů, Technický průvodce č. 50, Praha, SNTL 1983
- [8] MIKHOV, R., M.: An Algorithm for Synchronized Control of Multi-Motor Drive Systems, In 38th International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies – ICEST, Sofia, Bulgaria, Fac. of Automatics, Tech. Univ. of Sofia, Bulgaria, Heron Press Ltd, 2003, Page: 374-7
- [9] WANLI, X., ZHISHAN, D., BANGCHUN, W.: Characteristics of Electromechanical Coupling Self-Synchronization of a Multi-Motor Vibration Transmission System, *Chinese Journal of Mechanical Engineering* (English Edition), vol. 14, num. 3, September 2001, Page: 275-278
- [10] LEVI, E., et al.: A Novel Concept of a Multiphase, Multimotor Vector Controlled Drive System Supplied From a Single Voltage Source Inverter, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 19, num. 2, March 2004
- [11] LEVI, E., et al.: Operating Principles of a Multiphase, Multimotor Vector Controlled Drive, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 19, num. 3, September 2004
- [12] LAHOUD, M., A., HARLEY, R., G., BALDA, J., C.: Induction Motor Modelling for Short-Term Transient Studies in a Multigenerator-Multimotor Power System, *Electric Power System Research*, 7, Department of Electrical Engineering, University of Natal, Durban, 1984, Page: 53-63
- [13] LAHOUD, M., A., HARLEY, R.: Transmission Line Resonances as Influenced by Induction Motor Load Modelling in a Multigenerator-Multimotor Power System, *Electric Power System Research*, 7, Department of Electrical Engineering, University of Natal, Durban, 1984, Page: 65-81

- [14] FRASER, CH., MILNE, J.: Electro-Mechanical Engineering: An Integrated Approach, IEEE PRESS, New York, 1994, ISBN 0-7803-1142-6
- [15] KAMM, L., J.: Understanding Electro-Mechanical Engineering: An Introduction to Mechatronics, IEEE PRESS, New York, 1995, ISBN 0-7803-1031-4
- [16] KRATOCHVÍL, C., KREJSA, J.: Modelling of Drive Systems, 1. vydání, Brno University of Technology. Faculty of Mechanical Engineering. Institute of Mechanics of Solids, Brno, 2003, ISBN 80-214-2520-2
- [17] Malé stejnosměrné motory Maxon, Verze 1.1, Praha, UZIMEX PRAHA, 2002, 55 s.
- [18] KRATOCHVÍL, C., PROCHÁZKA, F.: Výpočtové modelování pohonových soustav, 2. vydání, Brno, 2004, ISBN 80-214-2850-3
- [19] KRATOCHVÍL, C., MALENOVSKÝ, E.: Pohony strojních soustav: Počítačové navrhování strojních soustav, 1. vydání, VUT v Čs. redakci VN MON, Brno, 1990, ISBN 80-214-0126-5
- [20] STEMME, O., WOLF, P.: Principles and Properties of Highly Dynamic DC Miniature Motors, The maxon-Team, Interelectric AG, 1994
- [21] SCHLEGEL, M.: Průmyslové PID regulátory: tutorial [online], publikováno 2003-03-04, [cit. 2006-07-11], <
http://www.rexcontrols.cz/clanky.php?id_clanku=29>
- [22] KULDA, V., KRAEMER, J.: Poruchy elektrických strojů, 1. vydání, Státní nakladatelství technické literatury, Praha, 1959.

AUTOROVO CURRICULUM VITAE

Osobní údaje:

Jméno a příjmení: Jiří Pulkrábek
Datum a místo narození: 13. 5. 1980, Ústí nad Orlicí

Pracovní zkušenosti:

1. 11. 2005 - doposud

Jméno a adresa
zaměstnavatele: SIEMENS Industrial Turbomachinery s.r.o., Olomoucká 7/9,
618 00, Brno
Oblast podnikání: Parní turbíny
Dosažená pozice: Zkušební technik - diagnostik
Pracovní náplň: Servis parních turbín, vibrodiagnostika

Dosažené vzdělání:

2003 - 2007

Vzdělávací instituce: Vysoké učení technické v Brně
Fakulta strojního inženýrství
Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Studijní obor: Inženýrská mechanika
Studijní program: Doktorské studium (Ph. D. program)
Téma disertační práce: Modelování dynamických vlastností vícemotorových pohonových soustav se sériově řazenými elektromotory

1998 - 2003

Vzdělávací instituce: Vysoké učení technické v Brně
Fakulta strojního inženýrství
Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Studijní obor: Inženýrská mechanika
Studijní program: Magisterské studium (Ing.)
Téma diplomové práce: Analýza vynuceného ustáleného kmitání nesymetrických rotorových soustav, včetně analýzy stability kmitání

1994 - 1998

Vzdělávací instituce: Střední průmyslová škola strojnická, Sokolská 1, Brno

SEZNAM PUBLIKACÍ

- [1] KRATOCHVÍL, C., PROCHÁZKA, F., PULKRÁBEK, J.: *Porovnání dynamických vlastností elektromechanických pohonových soustav se stejnosměrnými motory velkého a malého výkonu*, Proceedings of the 20th conference Computational Mechanics, Nečtiny, 2004
- [2] KRATOCHVÍL, C., PULKRÁBEK, J., FEREBAUER, J.: *Stochastická mechanika I. část*, UMTMB, Brno, 2004
- [3] PULKRÁBEK, J., PROCHÁZKA, F.: *Modelling of Dynamics Characteristics of Multi-motor Driving System with Serial Ordering of Motors – Basic Model*, Proceedings of national conference Engineering Mechanics, Svratka, 2005
- [4] PULKRÁBEK, J., PROCHÁZKA, F.: *Modelování dynamických vlastností vícemotorových pohonových soustav se sériově řazenými elektromotory*, Proceedings of 55th anniversary of foundation of the Faculty of Mechanical Engineering conference, Ostrava, 2005
- [5] KRATOCHVÍL, C., PROCHÁZKA, F., PULKRÁBEK, J.: *Pohonové soustavy v mechatronických objektech*, Proceedings of the 21th conference Computational Mechanics, Nečtiny, 2005
- [6] PULKRÁBEK, J., KRATOCHVÍL, C.: *Model creation of dual-motor driving system with serial ordering of motors*, Proceedings of national colloquium with international participation Dynamics of Machines 2006, Praha, 2006
- [7] PULKRÁBEK, J.: *Posouzení odezev regulované dvoumotorové pohonové soustavy se sériově řazenými elektromotory a vřelymi ne spojovacích prvcích na zadané zatěžování*. Proceedings of the 22th conference Computational Mechanics, Nečtiny, 2006

ABSTRACT

This dissertation deals with the problems of the modelling of dynamic characteristics of multi-motor drives with serial ordering of DC motors. It is proved, that the disadvantages of these driving systems are caused by the different characteristics of separate electromotors, even if they are of the same type. The aim of this work is to examine the influence of the particular characteristics of electromotors and connection elements on the system behaviour.

In the introduction, the problems and the present-day usage of multi-motor drives are described.

The next chapters deal with the contemporary state of the problems in question and with the chosen processing methods – the theories used. They were used in particular for making the model of the multi - motor driving system.

The main part of this work is dedicated to the building of the model of a multi - motor driving system and to the behaviour analysis of this system in the course of the change of the characteristics of separate electromotors and connection elements.