

Oponentní posudek

disertační práce k získání akademického titulu Doktor (Ph.D)

- Autor práce:* **Ing. David Lindr**
Technická universita v Liberci, Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií, Ústav mechatroniky a technické informatiky
- Téma práce:* **Řízení servopohonů v dynamicky náročných aplikacích**
- Školitel:* **Doc. Ing. Pavel Rydlo, Ph.D.**
Technická universita v Liberci, Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií, Ústav mechatroniky a technické informatiky
- Rozsah práce:* 141 stran včetně čelního listu, tří vakátů, prohlášení, anotace v českém a anglickém jazyce, předmluvy, seznamu obrázků, seznamu zkratk a značek, seznamu použitých symbolů, použité literatury a zadní strany, 81 obrázků, 12 tabulek a jedno demonstrační video

Rekapitulace cílů práce

Oponovaná disertační práce shrnuje výsledky, dosažené disertantem při teoretickém a experimentálním zkoumání možností zlepšení dynamického chování elektrických servopohonů v aplikacích typu elektronická vačka. Cíle práce jsou explicitně formulovány v kapitole na str. 1. 1.

Koncepčním cílem práce bylo přispět k vytvoření metodiky pro návrh kompletního elektrického pohonu ve funkci elektronické vačky tak, aby vyhověl svými dynamickými parametry požadavkům krokovacích mechanismů. Konkrétními cíli byla analýza dynamického chování elektronické vačky, na základě jejích výsledků stanovení metodiky návrhu optimálních parametrů regulační struktury servopohonů s ohledem na minimalizaci vlečné chyby polohového servomechanismu při dostatečné stabilitě regulovaného systému a kompenzaci reziduálních kmitů, způsobených vlivem poddajnosti mechanických komponent kinematického řetězce řízením aplikovatelným ve řídicí struktuře standardně vyráběných elektrických pohonů. Konstatuji, že splnění těchto cílů nepochybně představuje disertabilní problém.

Charakteristika práce a její výsledky

Práce je členěna do deseti kapitol, přičemž kapitola 1 je úvod, v kapitole 9 jsou shrnuty dosažené výsledky práce a zhodnoceny její přínosy, a kapitola 10 je závěr.

V úvodu (*Kap. 1*) je nejprve stručně formulována motivace autora a naznačena problematika, jejíž řešení je obsahem disertace. Po té jsou v podkapitole 1. 1 formulovány cíle disertační práce, ke kterým jsem se vyjádřil výše, a dále v podkapitole 1. 2 je vysvětleno členění práce a stručně charakterizován obsah jednotlivých kapitol.

Druhou kapitolu práce (*Problematika elektrických vaček*) je možné považovat za rešeršní studii. Jejím obsahem je popis klasických vačkových mechanismů, vysvětlen pojem „elektronická vačka“, obecně popsán způsob její realizace, stanoven konkrétní hardware (kombinace výkonové jednotky Sinamics S120 a jednotky pro řízení pohybu Simotion, oboje od firmy Siemens), který bude pro disertaci používán a konečně je uvedeno porovnání mechanismů s klasickou a elektronickou vačkou. Zde poznamenávám, že v názvu podkapitoly 1. 3 patrně vypadla spojka „a“.

Ve třetí kapitole (*Měřicí pracoviště pro testování elektronických vaček*) je postupně popsána stavba mechanismu (kinematický řetězec s poddajnou mechanickou vazbou, zatížený setrvačником), která umožňuje sestavit a testovat čtyři typy kinematických řetězců, popsány vlastnosti a parametry jednotlivých komponent elektronické vačky, definovány zdvihové závislosti pro testování elektronických vaček (polynomická, harmonická a parabolická funkce) a stanovena vlečná chyba jako hlavní veličina, z jejíž velikosti bude posuzována kvalita regulace.

Ve čtvrté kapitole (*Matematické modely*) je stanoven přístup k modelování založený na sestavení matematického modelu z modelu fyzikálního a pro vlastní modelování je zvoleno Matlab/Simulink. Vzhledem ke struktuře elektronické vačky (synchronní motor s permanentními magnety, kaskádní polohová regulace s podřízenou rychlostní a proudovou smyčkou a čtyři varianty kinematického řetězce) považují tento přístup za správný a odpovídající náročnosti úlohy a uvedené modely (ať již převzaté z literatury či nově vytvořené) za použitelné pro řešení stanovené úlohy. Jako drobný formální nedostatek vidím použití slangu v popisu rychlostní smyčky (.....je propustné pásmo rychlostní smyčky řádově stovky *Hertz*).

Pátá kapitola (*Verifikace matematických modelů*) je – jak název napovídá – věnována popisu verifikačních experimentů proudové, rychlostní a polohové smyčky. Verifikace byla prováděna postupně, tady od proudové přes rychlostní a konečně pro polohovou smyčku, tedy stejně, jako při syntéze regulačního obvodu. Matematické modely odvozené v předchozí kapitole z modelů fyzikálních jsou ovšem lineární a bylo je nezbytné doplnit o model dopravního zpoždění (proudová smyčka, vliv spínacího kmitočtu PWM a doby výpočtu požadované změny proudu motoru) a o modul výpočtu požadované hodnoty momentotvorné složky proudu motoru I_q – viz rovnice (27). Zde poznamenávám, že u jednotlivých smyček se hovoří o omezovačích akčních veličin, bloková schémata uvedená na Obr. 5. 1, 5. a 5. 9 však tyto nelinearity neobsahují. V této kapitole prezentované výsledky prokazují, že použitím integrálního kvadratického kritéria dle rovnice (25) bylo dosaženo dobré shody matematických modelů s chováním reálné soustavy s dvojitou poddajností. Zajímavé výsledky byly získány ověřením použitelnosti v praxi obvyklé náhrady proudové smyčky jednotkovým přenosem. Zde se ukazuje, že toto zjednodušení není pro rychlostní smyčku úplně korektní, zatímco pro polohovou je vcelku použitelné. Rovnice (26) však jistě není „tížený“ ale pravděpodobně kýžený vztah.

Šestá kapitola (*Analýza a syntéza regulační struktury za účelem zvyšování dynamiky a polohové přesnosti servomechanismu*) tvoří spolu s kapitolami sedmou (*Testování dynamiky elektronických vaček*) a osmou (*Metody vedoucí k potlačení residuálních kmitů na dvojhmotových dynamických systémech*) jádro disertační práce a jejich obsah prokazuje splnění stanovených cílů. Pro řešení stanovených úloh byla použita metoda geometrického místa kořenů (GMK) a pro simulační experimenty bylo opět využito prostředí Matlab Simulink, konkrétně jeho nástroje Simulink Control Designer (SCD), který umožňuje provést syntézu interaktivním způsobem, protože lze okamžitě sledovat odezvu soustavy po zásahu do jeho řídicího systému. Po analýze kinematického řetězce servomechanismu (Kap. 6. 1) byla provedena syntéza proudového regulátoru. Postupně je zkoumána proudová regulační smyčka s jednohmotovým systémem bez dopravního zpoždění, s dopravním zpožděním a je vysvětlen důvod, proč není zkoumáno chování proudové smyčky s dvojhmotovým systémem. v Kap. 6. 3 je prezentována syntéza rychlostního regulátoru. Postupně je zkoumáno chování rychlostní smyčky s jednohmotovým systémem a jednotkovým přenosem proudové smyčky a tentýž případ s dvojhmotovým systémem pro dvě různé hodnoty integrační konstanty rychlostního regulátoru. Syntéza polohového regulátoru je vysvětlena v Kap. 6. 4 a důležité poznatky byly získány porovnáním chování

uzavřené polohové smyčky dvojhmotového systému s nepřímým odměřováním (snímač na hřídeli motoru) a s přímým odměřováním (polohový snímač přímo na pracovním členu). Dále je uveden popis funkce DSC (Dynamic Servo Control) firmy Siemens, avšak bez přímé vazby k tématu celé kapitoly. Totéž se týká i Kap. 6. 6 (*Dopředné řízení rychlosti a proudu*) a Kap. 6. 7 (*Aplikace filtru žádaných hodnot*). Tato problematika je však aplikována při řešení náplně Kap. 7 a bylo by vhodnější ji zakomponovat zde. V této kapitole jsou popsány podmínky jednotlivých testů na zkušební stolici a uvedeny výsledné hodnoty stanovených parametrů regulátorů. Za cenné považuji, že výsledky experimentů a v podstatě potvrdily teoretická východiska a použitelnost simulačního modelování pro návrh stanovené kategorie pohonů. Úvodní text Kap 8 je v podstatě rešerší metod pro tlumení/potlačení residuálních kmitů pracovního členu vícehmotového kinematického řetězce. V dalších podkapitolách jsou uvedeny jak simulačně, tak experimentálně získané výsledky aplikace zpětnovazebních metod (regulační struktura využívající přímého odměřování polohy na hřídeli motoru a na pracovním členu servomechanismu, regulační struktura s modelem zátěže ve zpětné vazbě), metod aplikovaných v přímé větvi (kompenzace kmitů pomocí regulátoru s inverzní dynamikou, input shaping) na řešení této problematiky. Tyto výsledky vymezují použitelnost jednotlivých přístupů pro návrh pohonů s vysokou dynamikou.

V kapitole 9 (*Shrnutí dosažených výsledků*) nejprve disertant rekapituluje obsah práce a komentuje a zdůvodňuje postup jejího zpracování. Poté uvádí dosažené výsledky a obsáhle vysvětluje jejich význam a použitelnost pro návrh servomechanizmů s vysokou dynamikou. S jeho závěry souhlasím, je však škoda, že se nepokusil explicitně formulovat, jak byly splněny cíle disertace a zejména pak původní přínosy práce pro rozvoj vědního oboru, technickou praxi a pro výchovně-vzdělávací proces.

Desátá kapitola práce (*Závěr*) rekapituluje postup řešení stanoveného problému, jsou stručně shrnuty dosažené výsledky a jejich možné využití a je zde konstatováno, že byla vypracována komplexní metodika návrhu řídicího systému elektronické vačky.

Závěr:

Téma disertace je nepochybně aktuální, protože zlepšování dynamického chování servomechanizmů s vícehmotovými kinematickými řetězci je stále předmětem intenzivního výzkumu a vývoje.

Disertace ve všech podstatných aspektech splnila stanovené cíle. Disertant se dokázal úspěšně zhostit poměrně komplikovaného úkolu, získal velké množství obtížně získatelných experimentálních dat a při řešení disertační práce vytvořil původní přínos.

Postup řešení problému považuji za správný a adekvátní stanoveným cílům. Disertant vhodně využil teoretických poznatků, provedl velké množství simulačních a praktických experimentů a získaná data vhodně aplikoval na jím řešený úkol. Na základě teoretických východisek a vhodně zpracovaných experimentálně získaných dat vytvořil použitelnou metodiku a dospěl k závěrům využitelným v praxi. Původní přínos spočívá zejména ve stanovení postupu syntézy a ladění regulačních struktur komerčně vyráběných servopohonů pro netypické aplikace s vysoce dynamickým chováním.

Disertační práce má bezpochyby význam pro rozvoj vědního oboru a pro praxi. Navržená metodika řídicího systému rozvíjí současnou teorii a je využitelná v technické praxi. Velkou výhodou této metodiky je univerzálnost, názornost, jednoduchost a poměrně malá náročnost na výpočetní techniku a zpracování dat. Univerzálnosti řešení by však prospělo využití některého z nástrojů pro simulaci vícehmotových soustav (např. ADAMS).

Formální úprava disertační práce je na požadované úrovni, práce je srozumitelná, čtivá a prakticky se v ní nevyskytují terminologické duality a nepřesnosti. Kladem práce po formální stránce je její členění s formulací cílů, postrádám však explicitní formulaci

vlastního teoretického a praktického přínosu disertační práce. Práci by také prospěla větší stručnost, která by byla dosažitelná zařazením více podpůrných částí práce (např. problematika, vztahující se na jednohmotové systémy) do příloh. Takto je práce dobře srozumitelná, ale některé pasáže působí spíše jako učebnice, než jako vědecké dílo. Práce má velmi dobrou grafickou úroveň (obrázky, tabulky, schémata, grafy), ale autor se nevyhnul řadě překlepů a chyb, způsobených patrně zapnutými automatickými opravami Wordu. Dalším jazykovým nešvarem je časté užívání germanizmu „... pomocí něčeho...“. Citace nejsou příliš časté, ale umožňují dobrou orientaci mezi převzatými podklady a vlastními výsledky práce disertanta.

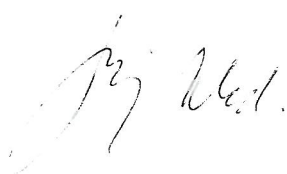
Celá disertační práce však svědčí o tom, že disertant ovládá metody vědecké práce, má hluboké teoretické a praktické dovednosti v oboru, je schopen přinášet nové teoretické poznatky a v technické praxi je aplikovat. Rád konstatuji, že je perspektivním vědecko-výzkumným pracovníkem s nadprůměrnou experimentální zdatností.

Pan Ing. David Lindr prokázal schopnost a připravenost k samostatné činnosti v oblasti výzkumu a vývoje a tím splnil podmínky stanovené v § 47, odst. 4 zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách. Proto doporučuji, aby mu byl po úspěšné obhajobě udělen akademický titul

„doktor (Ph.D.)“.

Během rozpravy požadují zodpovězení následujících otázek:

1. V práci je často diskutováno použití omezovačů akčních veličin (např. proudu motoru), v blokových schématech a následných analýzách však tyto nelinearity typu nasycení chybí. Přitom prostředí Matlab/Simulink umožňuje standardně s touto nelinearitou pracovat. Můžete toto zjednodušení vysvětlit, případně kvantifikovat tento vliv na některém příkladu?
2. Znáte nějaké IT nástroje pro simulační modelování vícehmotových soustav? Byly by využitelné pro Vaši práci, případně pro syntézu a ladění řídicích struktur jiných složitých mechatronických soustav?



Doc. Ing. Vladislav Singule, CSc.
Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně
Technická 2
616 69 Brno

V Brně dne 13. ledna 2012

Posudek doktorské disertační práce

Autor disertace: Ing. David Lindr
Název práce: Řízení servopohonů v dynamicky náročných aplikacích
Oponent: prof. Ing. Jan Skalla, CSc., KVS, Technická universita v Liberci

Předložená disertace se zabývá regulací servopohonu elektronické vačky a potlačením reziduálních kmitů výstupního členu. Užitečnost zvoleného tématu považuji za nespornou, protože vzrůstá počet aplikací elektronických vaček a práce tohoto druhu u nás chybí. Práce obsahuje 140 stran a přílohu CD.

Disertant si vytkl jako cíle práce:

- Stanovit metodiku návrhu optimálních parametrů regulace servopohonu elektronické vačky
- Nalézt a ověřit vhodné metody kompenzace reziduálních kmitů koncových členů elektronické vačky.

Konstatuji, že uvedené **cíle byly dosaženy**.

Rozbor současného stavu problematiky je v kapitole 2 (obecná problematika vačkových mechanismů) a v kapitole 3 (popis měřicího pracoviště). Odkazy na literaturu a hodnocení konkrétních řešení jsou uvedeny v příslušných kapitolách disertace. Čtvrtá a pátá část popisuje použitý model servopohonu (synchronní motor v proudové, rychlostní a polohové vazbě) a porovnává vlastnosti modelu s charakteristikami naměřenými na reálném pohonu. Verifikace modelů je provedena velmi pečlivě a autor dosáhl výbornou shodu s reálným pohonem.

Teoretický přínos práce je soustředěn v 6. až 8. kapitole. V 6. části je podrobně analyzován jak samotný polohový servopohon (tzv. motor s volným hřídelem) tak pohon včetně mechaniky tvořící dvoumotový systém. Jsou uvedeny příslušné přenosové funkce a kořenové hodografy ilustrující pohyb pólů a nul v komplexní rovině v závislosti na změnách základních parametrů a geometrická místa kořenů pro proudovou, rychlostní a polohovou smyčku. U kořenových hodografů na str. 68 – 70 by bylo vhodné uvést, pro jaký rozsah proměnných veličin byly sestaveny. Autor na základě tohoto rozboru stanovuje vhodné kombinace parametrů pro dosažení vysoké dynamiky pohonu. V této části je také uveden stručný popis klíčových částí regulace pohonu Siemens Simotion S120/C240. Velmi oceňuji pečlivou identifikaci jednotlivých regulačních smyček.

Sedmá kapitola uvádí naměřené charakteristiky servopohonu sledujícího harmonickou zdvihovou závislost pro tři mechanické varianty (samotný motor, motor se setrvačником a motor se setrvačником připojeným přes převodovku 1:33).

Osmá část tvoří těžiště celé práce a zabývá se potlačením reziduálních kmitů výstupu dvoumotového systému. Je navrženo a odzkoušeno zapojení kompenzace využívající rozdíl mezi rychlostí motoru a výstupního hřídele zátěže. Jsou testovány dvě varianty – odměřování polohy výstupu a rekonstrukce polohy výstupu pomocí modelu mechaniky. Další část uvádí výsledky kompenzace tzv. inverzním filtrem a pomocí metody "Input Shaping" (tvarování vstupu serva pomocí vhodně zvolených impulsů). Ve všech případech jsou uvedeny výsledky naměřené na zkušebním stavu. Je jen škoda, že autor neuvedl také průběhy polohové odchylky od žádaného průběhu jako na obr. 7-1 až 7-4, které by byly velmi zajímavé pro porovnání účinku jednotlivých metod kompenzace.

Hlavní přínos teoretické části vidím v porovnání účinnosti realizovatelných metod kompenzace reziduálních kmitů. Testované metody byly s ohledem na budoucí průmyslové aplikace správně omezeny na principy realizovatelné bez doplňujícího hardware (signálové procesory apod.).

Praktický přínos práce je v porovnání teoretických vývodů s měřením na zkušebním stavu. Souhlas modelů a měření je velmi dobrý. Výsledky disertace budou s největší pravděpodobností použity při vývoji elektronických vaček ve Výzkumném ústavu textilních stroj v Liberci.

Metody řešení použité v disertaci odpovídají zvolenému tématu. Při řešení disertant sestavil model servomechanismu elektronické vačky a provedl jeho podrobný rozbor. Porovnání s měřením na zkušebním stavu ukazuje, že model velmi dobře popisuje chování reálného mechanismu.

Celkově práci hodnotím jako velmi dobrou. Autor podrobně zpracoval problematiku tlumení reziduálních kmitů servomechanismů pro elektronické vačky. Správnost sestavených modelů prokazuje řada měření a shoda výsledků je velmi dobrá. Práce je zpracována pečlivě jen s ojedinělými překlepy. Autor by však měl věnovat větší pozornost formulacím, které jsou často nepřesné nebo nadbytečné nebo bez souvislosti s předchozím textem. Tyto formální chyby sice nemají žádný vliv na odvození a výsledky ale v disertační práci by se neměly objevovat. Některé příklady uvádím dále:

- Str. 21 – první odstavec budí dojem, že náhrada stejnosměrných motorů synchronními motory probíhá v současnosti (ve skutečnosti zhruba 1990 – 95). Dále: zkvalitnění výroby a zvýšení produktivity (spíše produkčnosti) vůbec nemusí být v protikladu. Používání motorů s nízkým momentem setrvačnosti není zcela jednoznačné – motor často představuje jen zlomek celkového momentu setrvačnosti.
- Str. 22⁵ – mechanická poddajnost není způsobena vůlemi (toto tvrzení se v práci ještě opakuje – např. na str. 47 nebo 98)
- Str. 27¹⁴ – "... elektronická vačka nahrazuje složitou mechanickou ..." – je otázka, co je složitější.
- Str. 39 – poslední odstavec: není třeba popisovat synchronní motor s elektrickým buzením.
- Str. 43 – pozn.: obr. 4-4 je až na konstantu $3/2p_0$ model stejnosměrného motoru.
- Str. 45³ a dále – popis proudové regulace je zavádějící a rozhodně neodpovídá lit. (10). Především jde o urychlení reakce proudu a tedy otáček motoru na změnu výstupního signálu rychlostního regulátoru.
- Str. 50₅ – přesně vzato jde o šířkovou pulsní modulaci, kterou aproximujeme dopravním zpožděním.
- Str. 68 – obr. 6-3 – je zaměněno označení charakteristik ε_1 a ε_3 .
- Str. 73₇ – neomezená stabilita obvodu není dána nepřítomností omezení akčních veličin ale zanedbáním dynamiky měniče (přenos s Padého rozvojem).
- Str. 95 (3. odstavec) – ponechání původního seřízení po připojení setrvačníku je chyba. Správně by mělo být zvětšeno zesílení regulátoru v poměru J_c/J_m . Protože ale setrvačník pravděpodobně vytvořil na některé poddajnosti kmitavý člen s vlastní frekvencí 655 Hz, vznikl tak dvouhmotový systém.
- Str. 100⁶ – tvrzení "... pokud jsou jednotlivé komponenty ... dostatečně pevné ..." je silně neurčité. Pohon můžeme považovat za jednohmotový systém jsou-li velikosti vlastních frekvencí mechanismu větší než např. desetinásobek propustného pásma rychlostní smyčky.

Mám následující **dotazy k obhajobě**:

- Verifikace proudové smyčky (str. 49): Měnič Sinamics skutečně reguluje složky proudu D a Q ? Není použit obvyklejší systém tří proudových regulátorů (pro každou fázi vinutí jeden)?
- Verifikace rychlostní smyčky (str. 54 a dále): Není možné vysvětlit nesouhlas modelu a reálného pohonu přítomností filtru, který není uveden v dokumentaci (nejspíše na výstupu rychlostního regulátoru)?

Disertace splnila sledovaný cíl – na základě podrobné analýzy servomechanismu elektronické vačky bylo navrženo seřízení regulátorů servopohonů a dále bylo navrženo a na zkušebním stavu odzkoušeno několik metod kompenzace reziduálních kmitů. Oceňuji velmi dobrý souhlas simulací sestavených modelů s výsledky měření na zkušebním stavu. Výše uvedené výhrady nejsou zásadní a neovlivňují výsledky práce. Disertace je pečlivě zpracována a má příkladnou grafickou úroveň.

ZÁVĚR

V předložené disertaci autor přesvědčivým způsobem prokázal, že má schopnosti pro tvůrčí vědeckou práci, ovládá vědecké metody práce a má hluboké teoretické znalosti. Cíl práce byl splněn a obhajované závěry považuji za správné. Práce je přínosem pro rozvoj vědního oboru a splňuje podmínky stanovené pro doktorské disertace.

Doporučuji proto přijmout práci k obhajobě.

Disertace byla hodnocena podle současného stavu rozvoje vědního oboru.

V Ronově nad Doubravou dne 6. 2. 2012



prof. Ing. Jan Skalla, CSc.
Technická universita v Liberci
Katedra Výrobních systémů