

Recenzní posudek doktorské disertační práce

Autor disertace: Ing. Vladislav Crhák
Název práce: Elektronické vačky v řídicím systému brusky radiálních vaček.
Školící pracoviště: Technická universita v Liberci, Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií.
Školitel: doc. Ing. Pavel Rydlo, Ph.D.
Recenzent: prof. Ing. Jan Skalla, CSc., Technická universita v Liberci, Fakulta strojní, Katedra výrobních systémů a automatizace.

Předložená disertace (160 stran včetně příloh, 113 obrázků a diagramů, 6 tabulek) se zabývá řízením NC brusky na výrobu vaček vyvinuté ve Výzkumném ústavu textilních strojů (VÚTS) v Liberci. Výroba vaček na NC strojích je specifický obor vyžadující vlastnosti, které nejsou zcela běžné u klasických NC strojů. Jedná se zejména o vysokou přesnost profilu vačky, potlačení vibrací apod. Příbuzné úlohy je třeba řešit při návrhu elektronických vaček, jejichž užití v průmyslu vzrůstá (elektronická vačka je v podstatě servomechanismus, který nahrazuje úplně nebo částečně mechanickou vačku). Zvolené téma je mimo vši pochybnost velmi potřebné, výsledky práce jsou užitečné a mají značný potenciál pro využití ve VÚTS i jinde v oboru.

Disertace je rozčleněna do osmi kapitol včetně úvodu a závěru. V rámci úvodu jsou uvedeny cíle práce a současný stav zpracovávané problematiky. Disertant si vytkl následující cíle:

- Rozbor struktury použitého servomechanismu a model procesu broušení;
- Návrh potlačení vibrací vznikajících při obrábění;
- Návrh metodiky měření vaček na obráběcím stroji;
- Metodika dimenzování elektrických pohonů s ohledem na tvar obrobku.

Záměrem bylo vytvořit ucelenou metodiku návrhu výrobního stroje od mechatronické koncepce až po naladění regulačních struktur. Je zřejmé, že takovýto objem prací dovoluje jen velmi obecný přístup. Nicméně konstatuji, že cíle práce byly v rámci možného rozsahu disertace splněny.

Rozbor současného stavu problematiky je uveden v úvodu a ve 3. kapitole. Autor zde velmi stručně uvádí přehled současného stavu výroby vaček. Ve druhé kapitole je popsáno řízení stroje BRV-300 CNC (vývoj VÚTS) a vysvětlen princip práce stroje v režimu elektronické vačky. Dále je uveden rozbor tvarových odchylek vznikajících při výrobě vaček.

Třetí kapitola se zabývá modely řízení synchronních motorů (model p-q a lineární model), které jsou pak použity pro další rozbor. V závěru kapitoly jsou porovnány přechodové děje modelu a reálného pohonu. Shoda měření a simulace je celkem dobrá. Není však uvedeno, zda byl použit lineární nebo p-q model.

Teoretický přínos práce je soustředěn ve čtvrté až sedmé kapitole. Ve 4. kapitole jsou uvedeny modely jedno-, dvou- a trojmotové soustavy a je proveden návrh regulátorů. Zde bych chtěl upozornit, že pro troj- a více-motové systémy je výhodné použít rozbor metodou konečných prvků a takto určené tvary kmitů použít v modelu pohonu (za řadu jiných např. Matyska, V: Paralelní chod dvou pohonů ... Disertační práce ČVUT, Fakulta strojní, Ústav výr. strojů a zařízení 2016). Pátá část řeší potlačení kmitů více-motových systémů. Uvedený rozbor je cenný; je ale škoda, že autor neuvedl porovnání výsledků

simulace s měřením. Šestá kapitola zpracovává problematiku měření profilu vaček a možnosti odstranění šumu z naměřených dat. Sedmá kapitola má název Metodika návrhu NC os a jde o statické a kinematické přizpůsobení pohonu s uvažováním zrychlujících momentů a sil. Bohužel nejsou uvažovány vlastní frekvence soustavy a pasivní odpory, což někdy může způsobit nestabilitu a/nebo nefunkčnost pohonu. Podrobnosti lze nalézt v lit. [29] (Souček) resp. v přednáškách Automatizace výrobních strojů (TUL FS, KSA).

Praktický přínos práce je implicitně soustředěn ve 4. až 7. kapitole, kde je uvedena řada poznatků použitelných při výrobě vaček. Je škoda, že autor neuvedl, které výsledky byly nebo budou využity.

Metody řešení použité v disertaci odpovídají zvolenému tématu a nemám k nim připomínky.

Celkově práci hodnotím jako dobrou. Autor v rozsahu odpovídajícím disertaci zpracoval problematiku výroby radiálních vaček na speciální CNC brusce. Významnou částí práce je rozbor metod potlačení reziduálních kmitů a návrh metody filtrace měření profilu vačky. Práce je zpracována velmi pečlivě jen se zcela ojedinělými překlepy a nepřesnostmi. Předností je také srozumitelnost bez újmy na přesnosti a na teoretické úrovni.

Nalezl jsem jen minimum formálních chyb, které nemají žádný vliv na další odvození a výsledky:

Str. 28 – obr. 2.4 – Lépe „Uspořádání NC os ...“

Str. 36₁₂ – rovnoběžnost není zajištěna ale změřena snímačem

Str. 37¹⁷ – odchylka ± 2 pulsy je patrně firemní údaj (se značnou rezervou). Při dobrém seřízení a vhodných podmínkách může být odchylka menší než jeden puls (servo osciluje na hraně mezi dvěma stavy D/A převodníku).

Str. 71 vztah (4.36) – v čitateli chybí člen $(s^2/\Omega_L^2 + 1)$

Str. 77 – Regulátor s derivační složkou se v praxi nepoužívá pro nadměrné zesilování šumu ve zpětnovazebních signálech.

Str. 79 obr. 4.23 – náhrada pulsní šířkové modulace časovou konstantou je možná ale lepší výsledky (při nevelké komplikaci modelu) dává přenos s Padého rozvojem 2. řádu.

Str. 90 až 100 – skok polohy zde má opodstatnění, protože vyniknou kmity serva. Protože se ale v polohových servomechanismech skok polohy vlastně nepoužívá, bylo by vhodné simulace pro informaci doplnit odezvou na skok (případně rampu nebo „S“ křivku) rychlosti. Kmity výrazně ukáže také skok zatěžující síly nebo momentu.

Str. 104₈ – má být „... kde není normála ke kontuře totožná s osou čidla ...“

Str. 106₂ – má být „... úhel normály v k normále kontury ...“

Str. 107 vztah (6.6) – má být $\Phi_N = \Phi_K - \Phi_R$

Str. 121 až 122 – měl by být uveden význam veličin – např. $M_{ZtrPřeC}$

Str. 125¹¹ a dále – při řízení v režimu elektronické vačky systém také reaguje až na základě zpětných vazeb. Výhodou je (jak autor uvádí dále) možnost předem spočítat a odladit dopředné vazby a tak zvýšit přesnost kontury vačky.

Str. 126¹³ – maximální vzdálenost dominantních pólů od imaginární osy není vždy nejvýhodnější (může klesat dynamická tuhost).

Str. 127₁ – měření v průběhu obrábění je problematické – třísky na povrchu obrobku zkreslují měření.

Str. 128₆ – je otázka, jestli použití nelineárního modelu motoru významně zpřesní simulaci. Spíše bych věřil na použití např. prvních pěti frekvencí MKP modelu mechaniky jak zmíněno výše v tomto posudku.

Str. 137 obr. B.1 – lépe „Pracovní oblast motoru (souřadnice M – n)“

Str. 138 – měření indukčnosti multimetrem může dávat nepřesné výsledky např. kvůli nelinearitám magnetických obvodů. Lepší je měřit odezvu na skok napětí, který vyvolá změnu proudu např. ze 2 na 5 A. Na druhou stranu tyto nepřesnosti parametrů motoru mají velmi malý vliv na chování modelu serva v proudové a rychlostní smyčce.

Str. 154 a dále – velikost deformace v krutu („zkрут“) má jen informativní hodnotu. Pro návrh serva jsou důležitější vlastní frekvence $f_0 = (\text{tuhost/hmotnost})^{1/2}/(2\pi)$

Mám následující **dotazy k obhajobě**:

- Které výsledky uvedené v práci byly ověřeny na zkušebním stavu nebo na stroji a s jakým výsledkem?
- Skutečně je metoda „input shaping“ ve velkém pásmu nezávislá na parametrech soustavy (str. 127 první odstavec). Zejména by mě zajímal vliv změn vlastní frekvence a (zhruba) o jak velké pásmo jde.
- Modely d-q uvedené v části 3.1 odpovídají řízení pohonů Yaskawa?

Disertace splnila sledovaný cíl – shrnula řadu důležitých partií týkajících se výroby vaček na NC stroji. Práce představuje potřebný příspěvek k řešení rozvíjejícího se oboru výroby vaček na NC strojích a k aplikacím elektronických vaček. Autor využil dostupné prameny, prostudoval je, správně se v nich orientoval a vyhodnotil jejich závěry. Publikáční činnost disertanta je poměrně rozsáhlá. 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 21. 3. 2017



prof. Ing. Jan Skalla, CSc.
Technická universita v Liberci
Katedra výrobních systémů a automatizace

Oponentský posudek disertace

Ing. Vladislav Crhák:

Elektronické vačky v řídicím systému brusky radiálních vaček

disertace zpracována na Fakultě mechatroniky, informatiky a mezioborových studií
TECHNICKÉ UNIVERZITY V LIBERCI

Posudek vypracoval:

Doc. Ing. Petr Voženílek, CSc., FEL ČVUT v Praze, Technická 2, 166 27 Praha 6

Předložená disertační práce je členěna do osmi vzájemně provázaných kapitol, čítá 160 stran, z toho 128 stran textu, 3 strany se seznamem použité literatury a 49 publikací autora přímo souvisejících s disertací a 27 stran příloh A až E.

Podstatnou disertabilní náplní práce je analýza zaměřená na návrh a vypracování matematického modelu broušení. Autor se zabýval volbou vhodné regulační struktury pro použité pohony, závislé na možnostech výběru vhodných hnacích motorů. Nedílnou součástí analýzy je optimalizace regulačních smyček a použitých regulátorů. Proces broušení vyžaduje nastavení regulace pro zajištění pokud možno vysoké dynamiky pohonů při dodržení přesnosti a tedy minimalizaci polohových chyb a přitom stability procesu. Z toho vyplynula nutnost řešení nežádoucích kmitů vyvolaných broušením a jejich minimalizace.

Řešení vycházelo z rozboru problematiky a stávajícího stavu výroby vaček a vačkových mechanismů, který je popsán v 1. kapitole. Z charakteristiky současného stavu lze usoudit, že disertant má o problematice široký přehled a je schopen tvůrčím způsobem získané poznatky vyhodnotit a aplikovat. Na klasické platformě disertant rozvíjel myšlenku náhrady původních technologií elektronickými systémy a jejich začleněním do mechatronického systému brusky.

Základní problémy a cíle disertace jsou jasně formulovány v kapitole 1.1.. Zároveň je řešení rámcově rozvrženo do několika fází řešení:

- Analýza využití elektronických vaček v procesu obrábění brousicího stroje.

Podrobná analýza je popsána ve 2. kapitole. Pro tvorbu řídicího systému v brousicím stroji byl použit HW fy *Yaskawa MP2300*. V této kapitole je zmíněno posouzení přesnosti obrábění, s doporučeními pro její zvýšení.

- Rozbor regulační struktury pohonu a analýza regulace soustavy.

Regulační schéma vychází z kaskádní regulace s proudovou, rychlostní a polohovou zpětnou vazbou. Brousicí stroj je osazen třemi synchronními motory *SMPM*. Model dynamické soustavy v prostředí *Matlab Simulink* byl vytvořen ze zjednodušeného modelu *SMPM*, modifikovaného pro stroj s vyniklými póly. Lineární matematický model *SMPM* s jednotkovou zátěží je popsán rovnicemi (3.25) až (3.29) a lineární blokové schéma je na Obr.3.6.

Autor zvolil vektorové řízení motoru jako nejvýhodnější z hlediska analýzy a syntézy pohonu a který zároveň vykazuje dobré vlastnosti, požadované pro přesné servopohony. Simulační model vektorového řízení pohonu se synchronním motorem je v Obr.3.10. Model byl nastaven tak, aby co nejlépe popisoval chování reálného stroje. V Obr. 3.11 a Obr.3.12 je porovnání odezvy polohy, momentu a rychlosti posuvu na jednotkový skok simulací a odpovídajících veličin získaných měřeními na reálném stroji. Porovnání vykazuje velmi dobrou shodu vybraných časových průběhů.

Popis činnosti složitého mechatronického systému přesného broušení vyžaduje přesnější matematický model, který respektuje i vibrace. Protože reálný systém uvažované brusky je dostatečně tuhý, lze v prvním přiblížení problém zjednodušit. Ve zprávě je rozpracována

analýza dvouhmotové soustavy s pružnou vazbou a rotující zátěží. Na ni navazuje analýza soustavy s třemi hmotami pružně uloženými. Simulační model tříhmotové soustavy je v Obr. 4.16. V 5. kapitole jsou popsány metody vedoucí k potlačení kmitání.

- Vytvoření metodiky měření obrobku přímo na obráběcím stroji

Při návrhu metodiky měření byl disertant limitován prostorem pro umístění měřidla. V 6. kapitole volil ze tří variant: jedné bezdotykové s laserovým snímačem a dvou dotykových s rolnou. Elegantní bezdotykovou variantu autor vyhodnotil jako nevýhodnou pro měření lesklých ploch, u nichž dochází k problematické odrazivosti světla a paprsek se po odrazu nevrací zpět k senzoru v požadované kvalitě. Dále se autor zabýval rozbořením funkce lineárního dotykového čidla a vahadla s rolnou. Navrhl způsob měření pomocí tzv. simulace obrábění, kdy se porovnávají rozdíly mezi rozměry vačky a vypočtenými daty. Data jsou zpracovávána výpočetním algoritmem, který řídí případné korekce obrábění. Na nich závisí technologie výroby kontury vačky.

- Vypracování metodiky dimenzování elektrického pohonu pro zadaný obrobek

Pro dimenzování komponent je vyvíjen program v prostředí *MS Excel*, jehož výstupem jsou požadované parametry pohonů, tj. servomotorů včetně frekvenčních měničů.

- Vytvoření matematického modelu pro predikci dynamického chování NC stroje a pro stanovení produkční rychlosti vačky.

Výroba vychází z požadavku zákazníka na konkrétní vačku a nejprve je navržena technologie výroby kontury vačky a konstrukční koncepce brusky. Z toho vychází požadavky na pohony. Metodika návrhu NC os včetně dynamiky je prezentována v 7. kapitole.

Námět předložené práce odpovídá oboru disertace a z hlediska současného stavu vědy v oboru elektrických pohonů v širším kontextu je vysoce aktuální. Pro nezanedbatelný význam pro vývoj a výrobu a pro vědecký potenciál je tedy zpracovávané téma plně disertabilní.

Hlavním přínosem předložené práce je komplexní zpracování poznatků z výzkumu, vývoje a testování brousicího stroje radiálních vaček. Je vypracována koncepce řídicího systému na bázi elektronických vaček a analýza struktury pohonů s potlačením kmitání a systému pro měření vaček přímo na stroji.

Na základě seznamu publikací souvisejících s disertací, který čítá 49 publikací, článků v časopisech a prezentací na tuzemských i zahraničních konferencích je možno konstatovat, že jádro disertace bylo na požadované úrovni publikováno.

Z předložené písemné části disertace a publikační činnosti konstatuji, že Ing. Vladislav Crhák je odborník na vysoké vědecké úrovni, navíc s vysokou kulturou písemného projevu. Toto prokázal mj. při zpracování písemné části disertace, která je velmi pečlivě připravena, psána přehledně, srozumitelně a prakticky se v ní nevyskytují chyby formálního rázu.

Disertaci pana Ing. Vladislava Crháka **doporučuji k obhajobě** pro řízení k udělení akademicko-vědeckého titulu doktora v oboru

Technická kybernetika.