

**Prof. Ing. Radim Farana, CSc. FEng.**  
Mendelova univerzita v Brně  
Provozně ekonomická fakulta  
Ústav informatiky  
Zemědělská 1  
613 00 BRNO  
E-mail: radim.farana@mendelu.cz

## OPONENTSKÝ POSUDEK DISERTAČNÍ PRÁCE

<i>Název práce:</i>	Moderní řízení pohybových stavů mechanické soustavy průmyslového robota prostřednictvím elektromechanických akčních členů
<i>Doktorand:</i>	Ing. Jiří Zátopek
<i>Školitel:</i>	Doc. RNDr. Ing. Zdeněk Úředníček, CSc.
<i>Studijní program</i>	Inženýrská informatika
<i>Studijní obor</i>	Automatické řízení a informatika

Oponentský posudek byl zpracován na základě jmenování oponenta děkanem FAI UTB ve Zlíně dne 23. 9. 2022.

Předložená disertační práce obsahuje titulní list, abstrakt v češtině a angličtině, obsah a vlastní text práce v celkovém rozsahu 262 stran včetně seznamu použité literatury a odborného životopisu studenta. Dále je práce doplněna dalšími přílohami rozšiřujícími prezentované výsledky práce. V seznamu použitých zdrojů je uvedeno 83 položek a 10 publikací vlastních, reprezentujících autorovy dosažené výsledky, většinou na odborných konferencích.

Disertační práce je příspěvkem k problematice řízení průmyslových robotů, spojuje výsledky konstrukčního návrhu regulované soustavy s návrhem a realizací řídicího systému, návrhem a ověřením systému řízení, typického pro současné robotické systémy.

### Téma a cíle disertační práce

Uchazeč v textu, po stručném úvodu s řadou odkazů na použitou literaturu, stanovuje cíle své práce, spojující konstrukční návrh reálného modelu silně nelineárního dynamického systému, návrh a technickou realizaci systému řízení, typického pro robotické systémy a návrh a ověření vhodných algoritmů řízení. Míra podrobnosti dílčích cílů přesahuje typické přístupy v disertační práci, postačilo by uvedení těch klíčových k přínosu pro rozvoj oboru.

Cíle disertační práce jsou aktuální, jejich splnění přináší nové poznatky do problematiky řízení průmyslových robotů, ale také analýzy obrazu nebo aplikace moderních algoritmů řízení. Vytvořený model systému řízení umožňuje kromě ověřování nových algoritmů řízení, také vhodné využití ve výuce odborných předmětů z oblasti průmyslových měření a technické kybernetiky. Jako nejvýznamnější přínos práce vidím ověření navržených metod řízení na reálném objektu a také využití analýzy obrazu s následujícími transformacemi pro určení polohy sledovaného objektu.

## Zvolené metody zpracování a dosažené výsledky

Základním krokem řešení je konstrukční návrh vytvářeného fyzického modelu, zejména jeho nosné konstrukce. Její statické namáhání je uvedeno na obr. 4.3. A v textu jsou postupně uvedeny problémy s tuhostí a pevností tohoto prvku, v příloze je pak dokumentována jeho destrukce. Nakolik to je možné poznat, došlo k destrukci na jiném místě, než bylo očekáváno podle analýzy namáhání, provedené metodou MKP. To by si zasloužilo lepšího vysvětlení v textu práce. Na str. 47 jsou zmíněny problémy s tuhostí nosné části modelu, ale není uvedeno, zda byly výkyvy nosné části změřeny a nakolik byly provedenou konstrukční úpravou odstraněny. Vhodná by také byla odpověď na otázku odolnosti vůči cyklickému namáhání, které se dá u tohoto systému oprávněně očekávat jako významný problém.

Na několika místech práce je použit pojem „přesný“, ve vztahu k rozměrům mechanických dílů a zejména jejich vzájemné interakci by však bylo nutné uvést stanovené výrobní tolerance, zejména když práce neobsahuje výkresovou dokumentaci. U měření polohy řízeného objektu pak chybí uvedení nejistot měření, které budou vzhledem k použití analýzy obrazu a následnému přepočtu polohy nezanedbatelné. Vzhledem k časovým konstantám regulované soustavy pak také časová konstanta měřicího systému může být nezanedbatelná. Významně se tento pojem objevuje v prezentaci výsledků řízení pod označením „přesný matematický model“ versus „zjednodušený matematický model“, myslím, že první název bez použití tohoto přívlastku by byl na místě.

Vzhledem k zaměření práce na oblast průmyslové robotiky vidím jako vhodné, že hmotnost motorů, převodů a dalších konstrukčních prvků zvyšuje celkovou hmotnost, a tedy také setrvačnost regulované soustavy, což přibližuje vytvořený fyzický model reálné situaci, zejména v oblasti robotiky, a umožňuje ověřovat metody řízení, typické pro ramena průmyslových robotů. Práce přitom vysvětlila nutnost vytvoření vlastního modelu řízeného systému, protože dostupná průmyslová ramena neumožňují potřebné zásahy do systému jejich řízení.

V části věnované návrhu systémů řízení a jejich následnému ověření je na více místech řešena otázka filtrace signálů, která je podmínkou pro použití PD regulátoru, resp. použití derivace signálu, v některých případech i vyšších řádů jako pro řízení v klouzavém módu. Tady by si práce zasloužila věnovat otázce filtrace větší pozornost, není zřejmé, zda filtrace vloženým proporcionálním členem je dostatečná a nebylo by vhodné zařazení filtru vyššího řádu, a jaký by to mělo vliv na dynamiku procesu řízení, zda by nebylo potřeba uvažovat se vzniklým dopravním zpožděním, které již nyní v regulačním obvodu vystupuje, protože všechny regulátory jsou realizovány číslicově. Naznačují to i průběhy řízení, viz např. obr. 4.85, kde je cíl řízení vyjádřen posloupností skokových změn polohy. Tento výsledek regulace rozvětveným regulačním obvodem také naznačuje u průběhu řízení reálného objektu vznik trvalých regulačních odchylek a bylo by na místě v práci řešit otázku požadovaného stupně astatismu uzavřeného regulačního obvodu, která mi v textu chybí.

Na tyto otázky pak navazuje část práce věnovaná řízení na bázi momentů, kde je opět diskutována otázka šumu, ale není zřejmé nakolik se jedná o projev nejistot měření, když jsou použité parametry uváděny s přesností na čtyři platné cifry. Citované použití bílého šumu (str. 175) vyžaduje uvedení přinejmenším jeho frekvenčního rozsahu, když skutečný bílý šum by měl nekonečný výkon. Opět je na místě otázka trvalých regulačních odchylek, z obr. 4.112 se pro skok polohy jeví jako nulové, ale hned následující obrázek 4.113 naznačuje nenulové trvalé regulační odchylky pro skok rychlosti, to se pak ještě zhoršuje v příkladu na obr. 4.115.

Práce pak končí porovnáním výsledků dvou navržených systémů řízení. V práci používaný pojem „Euklidovská regulační odchylka“ není v oblasti automatizace obvyklý, zřejmě je míněno nějaké integrální kritérium kvality regulace, bylo by vhodné uvést, zda jde o

integrál absolutní odchylky, případně integrál kvadratické odchylky, prostý integrál odchylky určitě použitelný není. Dosažené závěry pak korelují, dosažení vyšší přesnosti regulace je vyváženo vyšší energetickou náročností procesu řízení.

## Význam pro praxi a rozvoj vědního oboru

Z pohledu rozvoje vědního oboru předložená práce dokumentuje možnosti použitých metod od analýzy obrazu až po použité metody řízení, jejich návrh a dosažené výsledky. Vytvořený reálný model regulované soustavy v kinematické struktuře R-R pak umožňuje jejich praktické ověřování a může tak přispět k jejich správnému pochopení a aplikaci. Oceňuji také možnost využití výsledků disertační práce ve výuce odborných předmětů z oblasti technické kybernetiky.

## Formální úprava disertační práce a jazyková úroveň

Text práce je zpracován přehledně a věcně. Prezentované ilustrace jsou potřebné a zpracované na dobré grafické úrovni. Další jsou pak uvedeny v přílohách práce, tyto přílohy jsou v textu práce odkazovány. Vytvořená programová aplikace je dokumentována spíše z pohledu uživatele než návrháře, pro další práci na ní bych přivítal spíše uvedení příslušných modelů. Dokumentace výpočetních metod formou programových výpisů je díky barevnému rozlišení klíčových slov atp. vhodnější než obrazová forma (obr. 4.53), která je stěží čitelná. Podobně se ukrádá otázka ke smysluplnosti obr. 4.56, jehož čitelnost je na hranici rozpoznatelnosti. Některé odborné výrazy v textu by si zasloužily hlubší zamyšlení. Např. pojem „přenos aproximované přechodové charakteristiky“ na str. 153 je neobvyklý a zřejmě i nesprávný, zejména když je řeč o přenosu uzavřeného regulačního obvodu a jeho přechodové charakteristice. Obdobně nevidím jako vhodné používat zkratky 1. DOF a 2. DOF, když jsou míněny první a druhá řízená osa, hovoříme-li o robotické struktuře R-R. Takové nedokonalosti zbytečně snižují úroveň předložené disertační práce.

Nalezl jsem v práci jen malé množství překlepů (např. „spínaná zdroj“ namísto „spínaný zdroj“ v obr. 4.20 nebo „čacová konstanta“ místo „časová konstanta“ v obr. 4.92), některé typografické prohřešky (velké „O“ v odkazu na obrázek v textu) zřejmě způsobil použitý editační nástroj, u slova „viz“ prosím nepoužívat tečku, viz např. str. 167. Na správné pochopení textu to naštěstí nemá prakticky žádný vliv.

## Publikační činnost studenta

Publikační činnost doktoranda shledávám jako dostatečnou, v seznamu prací je uvedeno celkem deset výsledků vztahujících se nějakým způsobem k tématu práce, z toho je devět příspěvků na konferencích, převážně mezinárodních a jedna v recenzovaném odborném časopise, aktuálně zařazeném v Q4, pětiletý IF = 0,882. Aktuálně jsem v databázi Web of Science (bez nároku na úplnost) získal tři indexované záznamy jeho prací se dvěma citacemi bez autocitací. V databázi Scopus pak sedm záznamů s pěti citacemi bez autocitací. Tento rozsah publikačních aktivit vidím jako dostatečný pro doktoranda ve studijním oboru, zaměřeném na automatické řízení a informatiku, umožňující získat dostatečnou zpětnou vazbu na dosažené výsledky práce.

## Závěrečné hodnocení

K disertační práci mám následující připomínky a dotazy:

- Jaký je stupeň astatismu uzavřeného regulačního obvodu u rozvětveného regulačního obvodu a je dostatečný pro dosažení stanovených cílů řízení?
- Jaké kritérium kvality používáte při hodnocení kvality regulace?
- Nebyly problémy s výsledky dosaženými metodami Zieglera-Nicholse vzhledem k typicky velkým překmitům, kterými je vyvážena orientace na velkou rychlost regulačního procesu?
- Jak jsou výsledky Vaší práce využitelné pro oblast kolaborativní robotiky?

Na základě prostudování předložené práce konstatuji, že:

- a. Téma práce považuji za velmi aktuální a dostatečně náročné pro disertační práci.
- b. Disertační práce si stanovila náročné cíle, které splnila, hlavní přínos práce spatřuji v dokumentovaném návrhu a vytvořené konstrukci regulované soustavy, jejíž řídicí systém je otevřený pro potřebné experimenty, odladění a ověření dvou metod řízení, použitelných pro řízení průmyslových robotů.
- c. Postup práce, použité metody a postupy odpovídají cílům práce a přínos studenta k jejich dosažení je z disertační práce i publikací před odbornou veřejností zřejmý.
- d. Práce je aktuální a dosažené výsledky jsou přínosem jak pro praxi, tak i rozvoj vědního oboru a jsou vhodně využitelné i ve výuce odborných předmětů z oblasti technické kybernetiky.
- e. Formální úroveň práce a její jazyková úroveň odpovídá požadavkům na disertační práci.
- f. Publikáční činnost doktoranda odpovídá požadavkům na doktorské studium.

Na základě uvedených závěrů předloženou disertační práci:

~~doporučuji k obhajobě~~

V Brně, dne 12. 10. 2022

prof. Ing. Radim Farana, CSc. FEng.

## Oponentský posudok na dizertačnú prácu

Doktorand: Ing. Jiří Zátopek  
Odbor: Inženýrská informatika  
Téma dizertačnej práce: Moderní řízení pohybových stavů mechanické soustavy  
průmyslového robota prostřednictvím elektromechanických  
akčních členů  
Školitel': doc. RNDr. Ing. Zdeněk Úředníček, CSc.

### 1. Aktuálnosť zvolenej témy.

Dizertačná práca sa vo svojom jadre zaoberá porovnaním rôznych metód riadenia pohybu mechatronického systému, ktorý svojou koncepciou mechaniky zodpovedá správaniu sa sériového priemyselného robota. Toto porovnanie je uskutočnené nielen na simulačnej úrovni alebo na úrovni fyzikálnych modelov, ale aj prakticky na zhotovenom prototypu robota. Zadefinované a riešené ciele práce sú vysoko aktuálne. Dotýkajú sa nie len problematiky efektívneho riadenia najnižších vrstiev robotической platformy, ktorými sú samotné pohony jednotlivých osí platformy, ale aj nadradených systémov, akými sú spracovanie obrazu z kamery a jeho využitie v spätných väzbách, či regulácia polohy vybraného objektu. Každý krok si vyžadoval kvantum úsilia spojený hlavne s vytvorením nevyhnutného softvéru a hardvéru zahrňujúc zhotovenie potrebnej mechaniky. Z tohto pohľadu považujem prácu za veľmi komplexnú, mediodborovú a vynikajúco spracovanú.

### 2. Ciele dizertačnej práce a ich splnenie.

Nosným cieľom práce je vytvorenie demonštračnej platformy, umožňujúcej funkčnú ukážku regulácie polohy objektu, guľôčky na naklonenej rovine. Z technického pohľadu, je základnou požiadavkou určitá otvorenosť celého systému, aby bolo možné systém modifikovať, zakomponovávať nové funkcionality, testovanie iných komponentov atď. Tu by som rád zdôraznil, že autor urobil veľa tzv. „inžinierskej“ práce, ktorá pripravila pôdu ďalšej výskumníckej činnosti a významne tak napomohol ďalším adeptom doktorandského štúdia k ich samo realizácií sa na ich definovaných zadaniach, v čo verím, že sa v budúcnosti aj stane, prípadne už aj prebieha.

V tejto práci si autor zadefinoval niekoľko čiastkových úloh uvedených na stranách 25 až 26. Vzhľadom na ich počet a obsérne zadefinovanie by bolo neefektívne ich tu znovu definovať, môžem len potvrdiť, že autor splnil všetky úlohy v plnom rozsahu. Dôkazom toho sú prezentované výsledky v závere práce a priložených prílohách. Demonštračná platforma bola úspešne postavená, jej správanie porovnané s vytvoreným fyzikálnym modelom, potvrdená správnosť navrhnutých matematických modelov potrebných pre návrh vhodného typu riadenia koncovej polohy pohybujúceho sa objektu. Autor sa úspešne vysporiadal so vzniknutými problémami, od mechanicko-konstruktívnych, cez technologické spojené prevažne s 3D tlačou, dimenzovaním a nastavovaním jednotlivých komponentov až po samotné úskalía fyzickej implementácie navrhnutých riešení do reálneho systému postaveného na výpočtovom výkone Raspberry Pi.

### 3. Zvolené metódy riešenia a dosiahnuté výsledky práce s uvedením konkrétneho prínosu doktoranda.

Ku zvoleným metódam riešenia nemám žiadne pripomienky. Autor si zvolil štandardný postup. Avšak ku zvolenému postupu riešenie mám pár postrehov. Autor to nespomína, alebo aspoň v práci to nebolo uvedené na základe akých predpokladov boli navolené komponenty pre vyvíjanú platformu. Autor uvádza, že daná súčiastka bola zvolená, ale ako aj niektoré vzniknuté problémy ukázali, možná analýza či zakomponovanie fyzikálneho modelu do celého riadenia pred výrobou mohli napovedať, že príde ku komplikáciám. Patria sem veci spojené s nedostatočnou tuhosťou podstavy, praskanie držiakov či pracovanie na prúdových limitoch PMSM motorov. Tieto skutočnosti sa po ich vyriešení nestali v konečnom dôsledku kritické na dosiahnutie cieľov, ale asi sám autor vie najlepšie ako mu dosiahnutie cieľom komplikovali. Taktiež treba ale podotknúť, že sa takéto komplikácie stávajú v praxi bežne, aj keď je projekt riešený kolektívom pracovníkov a nie osamelým „bežcom“ ako tomu bolo tu, nič to však nemení na fakte, že je to dobrým poučením do budúcej praxe.

Vzhľadom na vysoké kvalitatívne parametre práce a dosiahnuté výsledky, by som nepovažoval za úplne potrebné tu detailne analyzovať čo v ktorej kapitole bolo v práci popísané. Samotný prínos doktoranda je však veľmi komplexný, pritom však aj trochu špecifický, preto predsa len trochu detailne. Dovolím si konštatovať, že hlavná časť práce začína kapitolou 4.4, zhotovením prototypu. Až po kapitolu 4.8, sa doktorand zaoberá popisom vytvorenej aplikácie a spracovaním obrazu, od jeho filtrácie, vyhladenia, detekcie objektu, až po zapracovanie kinematických transformácií a získaním tak absolútnej polohy sledovaného objektu vzhľadom na podložku. V tejto časti je jednoznačným prínosom doktoranda zostrojenie hotového mechatronického zariadenia detekujúce pohybujúci sa objekt v jeho priestore monitorovaný kamerou, v tomto prípade objekt pohybujúci sa po naklonenej rovine. Následné kapitoly ponúkajú popis matematického a fyzikálneho modelu zariadenia. Fyzikálny model je spracovaný veľmi kvalitne a precízne, obsahujúci všetky dôležité a relevantné aspekty (časové konštanty, vzorkovacie frekvencie, nelinearity) reálnej platformy, čo dokazujú aj porovnania s reálnymi priebehmi. Zhotovenie týchto modelov je opäť najrelevantnejším prínosom týchto podkapitol. Od podkapitoly 4.8.4 sa autor už venuje samotnej regulácii polohy platformy, či samotnej regulácii pohybu guľičky po rôznych trajektoriách. Na experimenty si zvolil porovnať dve regulačné štruktúry, kaskádovú reguláciu PI a P regulátormi, a reguláciu využívajúcu dopredné (z angl. známe ako feedforward) slučky, autorom nazvaný regulátor s výpočtom momentov. I keď správne zhodnotil možnosti a hlavne dôsledky použitia ďalších dvoch metód uvedených len v teoretickej rovine, bolo by veľmi zaujímavé vidieť ich realizované. Celá podkapitola 4.8.7 je venovaná porovnávaniam výsledkov regulácií podložky, 4.8.8 pohybu guľičky. Podkapitola 4.9. zhrňuje záverečné zhodnotenie s piatich rôznych pohľadov. Výsledky poukazujú na dva podstatné fakty. **Prvým je, že systém pracuje správne, je otvorený pre implementáciu rôznych algoritmov, a druhým je výborná zhoda fyzikálneho a reálneho modelu.** Rozdiel je v rozsahu do 3.4 %, čo pri tak komplexnom systéme je vynikajúci výsledok.

### 4. Význam pre prax a rozvoj vedného odboru.

Čo sa týka významu pre vedu a prax, veľa už bolo naznačené a preto budem stručný. Vytvorenie modelov, analýza použitých, ale aj zatiaľ, verím že „predbežne“ nepoužitých, riadiacich algoritmov, kvalitne a didakticky vynikajúco usporiadaný popis každého kroku uvedeného v práci jednoznačne prispieva k rozvoju vedného rozboru. Sprievodné obrázky

a časti kódov, zhotovený prototyp, dokázaná jeho funkčnosť a tým dokázaná reálna implementovanosť algoritmov aj do iných systémov sú hlavnými prínosmi pre prax. Využitie prototypu na edukačné a marketingové aktivity je už len „čerešničkou na torte“.

#### **5. Jazyková, terminologická a grafická úroveň práce**

Dizertačná práca je členená logicky a zrozumiteľne, je na vynikajúcej grafickej úrovni s minimom preklepov a gramatických chýb. Čo by však prospelo práci, by boli čitateľnejšie popisy osy grafov (príliš malé), prípadne lepšie číslovanie kapitol (jadro práce je obsiahnuté v jednej kapitole č.4). Niektoré ďalšie pripomienky sú uvedené v závere posudku.

#### **6. Prehľad publikovaných prác**

Jadro práce a dosiahnuté výsledky boli publikované v dostatočnej miere, a to v 9 konferenčných publikáciách a v 1 časopise. Poprosím však počas prezentácie vysvetliť, prečo je posledná publikácia až z roku 2018.

#### **7. Záver.**

Doktorandská dizertačná práca Ing. Jiřího Zátópka spĺňa podmienky stanovené zákonom o vysokých školách a preto odporúčam prijať dizertačnú prácu k obhajobe a po úspešnom obhájení udeliť pánovi Ing. Jiřímu Zátópkovi vedecko-pedagogický titul

Philosophiae doctor (PhD.)

Žilina 26.10.2022

## **Pripomienky a komentáre k dizertačnej práci**

### **Formálne pripomienky k práci:**

- Zoznam symbolov a skratiek obsahuje iba skratky
- Str.149, odkaz v texte na iný obrázok 4.65 vs, 4.66
- Popisy osí nečitateľné na viacerých obrázkoch
- Str. 201 – skratka RK vs. KR

### **K predloženej dizertačnej práci mám nasledovné otázky:**

1. Aká bola najvyššie dosiahnuteľná frekvencia vzorkovania z ktorou sa stíha obraz prepočítavať?
2. Na strane 153. píšete o „rampovani prúdu“ a jeho dôvod súvisí z konštrukcie a typu motora. Prosím vysvetliť?
3. Str.167, doba ustálenia pre obe osi bola zvolená odlišne, prosím ešte raz vysvetliť.
4. Neskúšali ste otočiť štruktúru polohového a rýchlostného regulátora P-PI za PI-P? Kapitola 4.8.7.



prof. Dr. Ing. Petr Novák  
Katedra robotiky, Fakulta strojní, VŠB-TUO  
17. listopadu 2172/15  
Ostrava-Poruba

Váš dopis značky / ze dne

Naše značka

Vyřizuje / linka

Ostrava

### Posudek disertační práce - oponent

Autor práce: Ing. Jiří Zátopek

Téma: Moderní řízení pohybových stavů mechanické soustavy průmyslového robota prostřednictvím elektromechanických akčních členů

Školitel: doc. RNDr. Ing. Zdeněk Úředníček, CSc.

Oponent: prof. Dr. Ing. Petr Novák

Oponentský posudek je vypracován na základě dopisu č. j. (neuveďeno), ze dne 23.9.2022, děkana Fakulty aplikované informatiky, Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, pana doc. Ing. Jiřího Vojtěška, Ph.D.

Disertační práce Ing. Jiřího Zátopka, v českém jazyce, obsahuje 262 stran textu plus přílohy A - S. Autor se v textu odkazuje na 83 literárních zdrojů a uvádí 10 svých publikací z let 2016 – 2018.

#### Aktuálnost tématu:

Disertační práce je zaměřená do oblasti řízení experimentálního mechatronického systému – konkrétně se zabývá porovnáním moderních neautonomních metod řízení pohybu, se standardní regulační strukturou na reálném systému s dynamickými projevy chování sériového manipulátoru.

Cíle disertační práce autor stanovuje:

Nosným tématem práce je vývoj, implementace a porovnání moderních algoritmů řízení mechatronického systému, včetně návrhu, vývoje a realizace tohoto systému. Přehledně je cíl práce, včetně potřebných kroků k jeho dosažení, popsán na stranách 25 a 26. V závěru úvodní kapitoly autor zmiňuje předpokládaný přínos této práce - možnost využití pro optimalizovaný návrh robotických struktur – výkonově (spotřeba), rozměrově, materiálově a tedy ve svém důsledku i cenově.

**Téma je podle mého názoru aktuální, zajímavé a přínosné jak pro praxi, tak i pro oblast teorie.**

### **Obsahová náplň:**

Po jednostránkovém úvodu následuje krátký popis současného stavu řešené problematiky – řízení polohy kuličky na nakloněné rovině, která polohována řízením pohonných jednotek.

Po kapitole definující cíle práce (bylo již zmíněno výše v textu) následuje rozsáhlá – dvěstěstránková - nosná kapitola disertační práce „Zvolené metody zpracování“. Autor zde řeší návrh testovací struktury, její konstrukční (strojní) návrh, potřebné elektro a elektronické vybavení (včetně akčního, senzorického a řídicího subsystému) a realizace prototypu(ů).

Následuje zajímavé podkapitoly popisující zpracování obrazu, od technického řešení po použité algoritmy, včetně potřebných kinematických transformací.

Vlastnímu řízení náklonu nakloněné roviny, pomocí dvojice pohonů, umožňující ovládat polohu kuličky umístěné na této rovině se věnuje stostránková podkapitola „Řízení pohybu“. V podstatě se jedná, spolu s následující podkapitolou „Závěrečné vyhodnocení“ (měla by být spíše nazvána „Díličí vyhodnocení“), o nosný text této práce. V této podkapitole se autor věnuje vyhodnocení dosažených výsledků z pohledu:

1. regulační odchylky,
2. rychlosti regulace,
3. velikosti spotřebované energie v průběhu regulace,
4. míře podobnosti chování reálného systému a jeho fyzikálního modelu v průběhu regulace,
5. mechanického zatížení systému.

Tato vyhodnocení – porovnání výsledků dosažených kaskádní regulací a regulací momentů – jsou provedena kvalitně a také fundovaně zdůvodněna (podkapitola 4.9.6). Popisu dosažených dílčích výsledků práce, jak byly definovány v úvodu, je věnována pátá kapitola.

**Je zřejmé, že doktorand všechny stanovené cíle splnil.**

Přínosy výsledků práce pro vědu a praxi jsou uvedeny v šesté kapitole, závěrečné vyhodnocení pak v sedmé kapitole.

**Autora práce musím pochválit – text je napsán jasně, pečlivě a srozumitelně (až na několik detailů – viz mé připomínky dále).**

#### **Formální náležitosti:**

Text obsahuje několik překlepů, tematicky je vhodně rozložen, jednotlivé kapitoly mají logickou návaznost. Práce je – podle mého názoru – zbytečně rozsáhlá – určitě by neutrpělo zkrácení podkapitol 4.1 až 4.5. (I když je zde autorem prezentován obrovský kus jeho práce na vývoji vlastního zařízení a chápu jeho snahu toto zmínit...)

#### **Připomínky:**

V textu práce autor na více místech (poprvé str.21) používá termín „Zákon řízení“. Nejsem si vědom, že by se tento termín používal. V úvodu práce postrádám – aspoň krátký – rozbor požadavků na vyvíjené zařízení, tedy jakýsi požadavkový list, na jehož základě je proveden vlastní návrh a výběr komponent (např. dimenzování pohonů). Např. požadované rozsahy pohybu plošiny, rychlosti, momenty, hmotnost atd. Na str.32 autor zmiňuje termín datové žíly. Mělo být použito termínu vodiče, nebo linky atp. Na stejné straně je také zmínka o použití více-otáčkového 17 bitového enkodéru. Předpokládám, že se jedná o absolutní senzor polohy.

Dále autor v textu používá pro název barevného prostoru BGR, namísto zažitého RGB (to je ale formální připomínka).

Na text práce navazuje řada rozsáhlých příloh, A – F jsou zdrojové texty navrženého SW. Použitý font je však tak malý, že jsou nečitelné. Toto mohlo být ošetřeno např. vložením CD ROM s těmito soubory, nebo s odkazem na jejich on-line dostupnost.

### **Otázky a připomínky k obhajobě:**

1. Použitý termín „Zákon řízení“ – je správně, nebo měl být použit termín Zákon řízení?
2. Doplňte a zdůvodněte – ve zjednodušené formě – požadavkový list na strojní, akční, senzorický (včetně strojového vidění) a řídicí subsystém.
3. Proč je použit více-otáčkový senzor polohy (viz str.32)?
4. Součástí pohonů jsou planetové převodovky. Jaký jiný typ převodovek byste mohl použít abyste eliminoval jeden z jejich nedostatků – vůli?

### **Závěrečné hodnocení:**

Autor úspěšně demonstruje svou erudici jako mechatronik – strojní část – návrh, realizace, potřebné akční, senzorické a řídicí subsystémy, vývoj potřebného SW, včetně rozsáhlých teoretických znalostí a kompetencí.

Předložená disertační práce plně splňuje stanovené cíle. Jedná se o zajímavé a pro praxi potřebné téma, autor se orientuje v celé šíři dané problematiky. Práce stanovené cíle splňuje.

**Disertační práci doporučuji k obhajobě, mnou uvedené připomínky nesnižují její kvalitu a považuji ji za velice zdařilou.**

V Ostravě, 7.10.2022

prof. Dr. Ing. Petr Novák