

## Posudek vedoucího na bakalářskou práci

**Název práce:** Návrh řídicího systému autonomního závodního vozidla  
**Autor práce:** Marek Boháč  
**Vedoucí práce:** Doc. Ing. Martin Hromčík, Ph.D., katedra řídicí techniky FEL ČVUT v Praze

Bakalářská práce Marka Boháče pojednává o systémech řízení pro autonomní závodní vozy. Práce je motivovaná vývojem studentské autonomní formule týmu eForce, se kterou se chce tým FEL ČVUT zapojit do série světových studentských soutěží. Marek Boháč zaujímá v tomto studentském týmu významné místo a ve své bakalářské práci představuje hlavní svoje dosažené výsledky na tomto projektu.

Hlavními výsledky práce jsou navržená a implementovaná architektura komplexního systému řízení v systému ROS, implementovaný a zvalidovaný simulátor jízdní dynamiky pro účely HIL a SIL simulací (hardware in the loop, software in the loop), implementace algoritmu pro generování trajektorie a referenční rychlostí, a konečně algoritmy stranového i podélného řízení dynamiky vozu. Dosažené dílčí výsledky Marek integroval v systému ROS a jejich funkcionalitu ověřil jednak ve virtuálním závodě studentských formulí a též experimentálně s využitím modifikovaného radiem řízeného modelu automobilu v měřítku 1:5 (vyvinutého v rámci jiného projektu).

Student pracoval samostatně a splnil všechny body zadání. Na konzultace přicházel velmi dobře připravený, prezentoval řešení aktuálních problémů a plány na další období. Frekvence konzultací byla zpočátku nižší než bych si byl býval osobně představoval; částečně asi z důvodů epidemiologické situace, ale nejenom. Poslední měsíc až dva před odevzdáním nicméně student komunikoval velmi intenzivně a poctivě zapracovával moje připomínky a návrhy. Co se formální stránky týká, práce je psaná dobrou angličtinou. Významné připomínky nemám; snad jen úvodní kapitola mohla být možná více rozvinutá.

Dosažené Markovy výsledky jsou podle mého názoru velmi kvalitní a předloženou práci hodnotím jako vynikající. Oceňuji, že student musel zvládnout nastudovat mnoho oblastí a naučit se používat a efektivně zkombinovat řadu SW nástrojů. Jde konkrétně o oblasti umělé inteligence a strojového učení, systémů řízení, embedded zařízení a operačních systémů reálného času. Oceňuji rovněž rozsah a kvalitu provedených experimentů pro validaci výsledků; jde bezesporu o velký kus práce, kterou student odvedl.

### *Celkové zhodnocení*

Práci doporučuji k obhajobě. **Navrhuji hodnocení A-výborně.**

V Praze dne 25.8.2020.

.....  
Doc. Ing. Martin Hromčík, Ph.D.

**I. IDENTIFIKAČNÍ ÚDAJE**

<b>Název práce:</b>	Design of Control System for an Autonomous Racecar
<b>Jméno autora:</b>	Marek Boháč
<b>Typ práce:</b>	bakalářská
<b>Fakulta/ústav:</b>	Fakulta elektrotechnická (FEL)
<b>Katedra/ústav:</b>	Department of Control Engineering
<b>Oponent práce:</b>	Ing. David Vošahlík
<b>Pracoviště oponenta práce:</b>	Katedra řídicí techniky, Fakulta elektrotechnická (FEL), ČVUT v Praze

**II. HODNOCENÍ JEDNOTLIVÝCH KRITÉRIÍ**

<b>Zadání</b>	<b>náročnější</b>
<i>Hodnocení náročnosti zadání závěrečné práce.</i>	
Zadání bylo zvoleno ambiciózní a náročnější než průměrné zadání. Student měl navázat na předešlou práci svých kolegů z týmu formule a implementovat zákony řízení do reálného operačního systému experimentální vozidla.	

<b>Splnění zadání</b>	<b>splněno s menšími výhradami</b>
<i>Posuďte, zda předložená závěrečná práce splňuje zadání. V komentáři případně uveďte body zadání, které nebyly zcela splněny, nebo zda je práce oproti zadání rozšířena. Nebylo-li zadání zcela splněno, pokuste se posoudit závažnost, dopady a případně i příčiny jednotlivých nedostatků.</i>	
Práce splňuje všechny body zadání. Jediné, k čemu bych měl výhrady je bod 5, který hovoří o experimentální verifikaci regulátoru. Regulátor nakonec nebyl verifikován na reálném systému. Domnívám se, že z velké části na tom nese vinu situace vzniklá globální pandemií koronaviru. Nicméně regulátor byl nasazen v soutěži na simulátoru FSDS, který nahrazoval reálné formule a byl provozován a poskytnut provozovateli soutěže. Předpokládám tedy, že šlo o model velmi blízký realitě, který navíc nebyl plně otevřený pro autora práce. Autor znal jenom interface, na který se připojil.	
Dále jsem v práci nenašel žádný graf, který by demonstroval funkci regulátoru. Také zde nebylo uvedeno, jak byl daný regulátor diskretizován, aby mohl být nasazen do reálného systému. V práci se hovoří pouze o spojitém čase a ani v příloženém kódu jsem nebyl schopný dohledat, jak se vypočítává integrál/suma chyby.	

<b>Zvolený postup řešení</b>	<b>vynikající</b>
<i>Posuďte, zda student zvolil správný postup nebo metody řešení.</i>	
Student řešil všechny body zadání odpovídajícími metodami a postupy.	

<b>Odborná úroveň</b>	<b>C - dobře</b>
<i>Posuďte úroveň odbornosti závěrečné práce, využití znalostí získaných studiem a z odborné literatury, využití podkladů a dat získaných z praxe.</i>	
Mám několik výhrad k popisu Single-track modelu, který autor použil jako nelineární model. V podkapitole 3.1 je na rovnice 3.1 – 3.3 ukazováno jako na Newton-Euler rovnice, ačkoliv se jedná pouze o rozbor sil a momentů působících v těžišti.	
Rovnice 3.5 – 3.9 jsou transformací Newton-Euler rovnic, které vůbec nejsou v textu uvedeny ačkoliv na ně je odkazováno jako na „The equations“.	
$e_c$ použité v rovnici 5.1 by se hodilo trochu více dovysvětlit – je zde pouze pojmenována jako „crosstrack error“. Musel jsem jít až do příslušného článku, kde byl hezký obrázek vysvětlující tuto veličinu. Proč tento obrázek nebyl převzat do práce?	
V podkapitole 5.1 se také píše, že stranový regulátor má exponenciální konvergenci, ačkoliv v článku je uvedeno, že konvergence je mezi lineární a exponenciální konvergencí.	

<b>Formální a jazyková úroveň, rozsah práce</b>	<b>B - velmi dobře</b>
<i>Posuďte správnost používání formálních zápisů obsažených v práci. Posuďte typografickou a jazykovou stránku.</i>	

Autor psal práci v angličtině, což je samo o sobě náročnější, nicméně autor se s touto výzvou popasoval dobře. Co bych autorovi vytknul jsou reference na obrázky, rovnice a kapitoly. Občas chyběly téměř úplně (např. v kapitole 3 chyběly odkazy na použité obrázky). Občas také nebylo v textu jasné, zda se autor odkazuje na kapitolu, obrázek nebo literaturu. V textu také chybí odkud se vzal algoritmus 1, to že algoritmus autor převzal od kolegy jsem se dočetl až v hodnocení práce (kapitola 10).

V rovnicích 3.8 a 3.9 není řečeno co je  $\omega$ . Je zde použita jako úhlová rychlost kol. Občas nejsou vysvětleny použité symboly v rovnicích (např. rovnice 3.8, 3.19, 5.4 používají symboly  $R$ ,  $C_L$  a  $C_y$ ). Až v dodatku je řečeno, co by tyto konstanty měli představovat.

**Výběr zdrojů, korektnost citací**

**A - výborně**

*Vyjádřete se k aktivitě studenta při získávání a využívání studijních materiálů k řešení závěrečné práce. Charakterizujte výběr pramenů. Posuďte, zda student využil všechny relevantní zdroje. Ověřte, zda jsou všechny převzaté prvky řádně odlišeny od vlastních výsledků a úvah, zda nedošlo k porušení citační etiky a zda jsou bibliografické citace úplné a v souladu s citačními zvyklostmi a normami.*

Pro vypracování práce byly použity odpovídající knihy a také i články z nedávných konferencí (implementovaný zákon stranového řízení).

**Další komentáře a hodnocení**

*Vyjádřete se k úrovni dosažených hlavních výsledků závěrečné práce, např. k úrovni teoretických výsledků, nebo k úrovni a funkčnosti technického nebo programového vytvořeného řešení, publikačním výstupům, experimentální zručnosti apod.*

Práce se četla hezky. Přidal bych pouze více vysvětlujících diagramů/obrázků a grafů. Například místo popisování „acceleration track“ by se hodil její náčrt.

U vysvětlení obrázku 7.4 se říká, že je vidět, že průměrná rychlost překračuje limit 4 m/s. Z obrázku není vůbec jasné kolik je průměrná rychlost, ačkoliv je vidět, že to musí být více než 4 m/s. Tato hodnota by mohla být uvedena v textu nebo popisu obrázku.

**III. CELKOVÉ HODNOCENÍ, OTÁZKY K OBHAJOBĚ, NÁVRH KLASIFIKACE**

*Shrňte aspekty závěrečné práce, které nejvíce ovlivnily Vaše celkové hodnocení. Uvedte případné otázky, které by měl student zodpovědět při obhajobě závěrečné práce před komisí.*

Práce se mi celkově velice líbila. Bylo zde mnoho věcí udělaných nad rámec zadání práce (např. motion planning). Bohužel kvůli koronavirové krizi nebylo možno implementovat regulátor na formuli ačkoliv student naimplementoval mnoho algoritmů, které byly nasazeny i na reálném systému. Současně byly algoritmy simulačně otestovány v soutěži autonomních formulí. Je škoda, že odvedená práce nebyla trošku lépe zdokumentována. Mé otázky k práci jsou:

1. Byla experimentální verifikace provedena i jinak než na simulátoru FSDS?
2. Je v rovnici 3.1 správně použito v druhém i třetím členu  $F_{y,f}$ ?
3. Jak je diskretizován regulátor pro použití na reálném systému a jak se vypočítává integrál chyby pro regulátor podélné dynamiky?
4. Proč je v rovnici 5.5 použito  $\frac{3}{2}k_i$ , když  $k_i$  je konstanta k naladění?
5. Na závěru podkapitoly 5.1 se hovoří o tom, že v budoucnu by se mohl použít i nelineární regulátor. Použitý „Stanley control law“ je tedy lineární?

Předloženou závěrečnou práci hodnotím klasifikačním stupněm **C - dobře**.

V Praze 20.8.2020

Podpis: