

*Posudek na bakalářskou práci Ondřeje Kukly Modeling, simulation and control
of the VANGUARD CTU student rocket*

Práce pojednává o systému aktivní stabilizace rotace kolem podélné osy pro studentskou raketu ČVUT Vanguard. Výsledky zahrnují modelování a simulaci translační a rotační dynamiky rakety, identifikaci parametrů z aerodynamických výpočtů a letových experimentů, návrh zákonů řízení a jejich implementaci v palubní řídicí jednotce, validaci algoritmů řízení v SIL a HIL režimu.

Záběr je to tedy dost široký, na bakalářskou práci, to je potřeba vyzdvihnout. Zároveň podle mého názoru je i odborná úroveň výsledků velmi vysoká, nadprůměrná pro bakalářský projekt. Souvisí to s příkladným přístupem studenta, s jeho aktivním přístupem ke konzultacím a k výzám projektu, nasloucháním mým doporučením a úkolům a jejich plnění. Velmi tento přístup pana kolegy studenta chválím.

Práce je psaná dobrou angličtinou, nemám vážnější připomínky. Terminologii nemá student vždy úplně stoprocentně zažitou, což se u bakalářské práce dá očekávat a tolerovat. Struktura práce je dobrá, zejména u popisu vlastních výsledků autora, vše podstatné je podle mého názoru srozumitelně a přesvědčivě popsáno.

Hodnocení: Pan kolega Kukla je podle mého názoru motivovaný, pracovitý a bystrý student. Odvedl podle mě vynikající práci. Hodnotím ji stupněm **A-výborně**.

V Praze dne 5.6.2024

.....

doc. Ing. Martin Hromčík, Ph.D.
katedra řídicí techniky
FEL ČVUT v Praze

Posudek oponenta bakalářské práce

Název: Modelling, simulation and control of the VANGUARD CTU student rocket

Autor: **Ondřej Kukla**

Cílem práce bylo vytvořit simulační model pohybu rakety a pro její příčný pohyb příslušnou část modelu identifikovat pro raketu VANGUARD a navrhnout vhodný regulátor, ověřit ho v simulačním programu a implementovat v letovém počítači.

Všechny cíle práce byly splněny, byť k otestování na reálné raketě nedošlo, jelikož raketa nerotovala. Pro vytvoření modelu rotačního pohybu byly použity linearizované rovnice popisující tento pohyb u letadla. Zde si nejsem jist, jestli je to možné, neboť u rakety se síly na ni působící mění během letu mnohem více než u letadla a při linearizaci by mohlo dojít k zanedbání jejich vlivu. Parametry příčného pohybu byly zjištěny jednak na základě jejich přímé znalosti, jednak experimentálně ze simulačního modelu. Z rovnice (2, kap. 4.2) je patrné, že se jedná o systém prvního řádu s proměnnými koeficienty kvůli závislosti na rychlosti a hustotě vzduchu. Student provádí identifikaci parametrů modelu ze simulovaných přechodových charakteristik pro různé rychlosti – to je zbytečně komplikované, parametry lze získat početně linearizací. Následně se vezme průměrná hodnota parametrů. Z grafů 4.5 – 4.8 je patrné, že tento přístup není vhodný, systém se evidentně nechová jako systém prvního řádu a takto získaný model není použitelný. Navíc se zde neuvažuje vliv proměnné hustoty vzduchu, ten je diskutován až v následující kapitole. V té se student pokouší identifikovat systém jako systém 2. řádu, což je rozumné, nedělá to však příliš vhodně (nafitovat co nejlépe systémem 1. řádu a doladit přidáním dalšího systému 1. řádu). Vhodnější by bylo vzít přechodovou charakteristiku jako celek a použít metody identifikace z přechodové charakteristiky systémů vyšších řádů. Existují empirické vzorce (v minulosti velmi populární Strejcova metoda), které z jistých časových hodnot spočítají obě časové konstanty. Také použitý termín doplnit o časové zpoždění je nesprávný, jde o doplnění systémem 1. řádu. Nicméně získaný model 2. řádu se zdá být rozumnou aproximací a použitelný pro návrh regulátoru v kap. 5.

Při návrhu a simulačním ověření regulace není zcela jasné, jak celý proces probíhá. Regulační schema na obr 5.10 není úplné, protože v tomto případě je reference vždy nulová (i když v praxi by nenulová rotace možná mohla pomoci při stabilizaci letu) a chybí zde poruchový signál, který simulaci „rozhýbe“. Jeho typ a tvar by bylo samozřejmě vhodné zvolit vzhledem k příčině rotace. Ta je nejasná, ani zde není nijak diskutována a při závěrečném testování v tunelu se dokonce ukáže, že k ní nedochází. V textu je pouze uvedeno, že onou poruchou je „slight offset introduced on its main stabilizers“, což chápám jako poruchu na vstupu do systému (load disturbance), dle nutnosti integrační složky pravděpodobně typu skok. Ona porucha nejspíš odpovídá proměnné „error“ ve vztahu (11) v kap. 6.2. Zde je sice uvedena hodnota, ale opět není jasné, jestli jde o pulz nebo skok.

V kap. 6 je navržen PI regulátor pomocí analýzy odezvy systému 2. řádu, kde byl použit model systému 1. řádu. To mi nepřijde správné, neboť přechodové charakteristiky jasně ukazují, že model 1. řádu je nevhodný (i když ve zpětné vazbě vše funguje).

Výtku bych měl ke způsobu číslování rovnic, je vhodné, aby každá rovnice měla unikátní označení. Při velkém množství parametrů a veličin jako je tomu právě u popisu pohybu rakety je rovněž nezbytný jejich seznam s popisem, jinak je velmi složité se v textu orientovat. Mnoho

z nich není vysvětleno ani v textu. U popisu os grafů doporučuji ke slovnímu označení přidat i použitý symbol.

Práce je na poměry bakalářské práce velmi rozsáhlá, student při její tvorbě vynaložil značné úsilí a i jen z textu je vidět velký zápal pro věc. Literatury věnující se řízení raket evidentně není mnoho, byla nutná jistá výpomoc z oboru řízení letadel, s tím se student vypořádal velmi dobře. Práce je psána velmi slušnou angličtinou s minimem chyb a překlepů, obsahuje poměrně velký počet referencí. A i při uvažovaných zjednodušujících předpokladech je evidentní, že řízení rakety je mnohem složitější než řízení letadla a i jen zdánlivě jednoduchý úkol stabilizace rotace vyžaduje pokročilější způsoby řízení.

Vzhledem k tomu, že uvedené výtky nejsou závažné a jsou spíše formálního charakteru, práci doporučuji k obhajobě a hodnotím ji stupněm **B–velmi dobře**.

V Praze 31. 5. 2024

doc. Ing. Petr Hušek, Ph.D. – oponent