

## I. IDENTIFIKAČNÍ ÚDAJE

<b>Název práce:</b>	Odhad a optimalizace spotřeby energie během letu UAV
<b>Jméno autora:</b>	Miroslav Kovář
<b>Typ práce:</b>	bakalářská
<b>Fakulta/ústav:</b>	Fakulta elektrotechnická (FEL)
<b>Katedra/ústav:</b>	Katedra kybernetiky
<b>Vedoucí práce:</b>	Ing. František Nekovář
<b>Pracoviště vedoucího práce:</b>	Katedra kybernetiky

## II. HODNOCENÍ JEDNOTLIVÝCH KRITÉRIÍ

<b>Zadání</b>	<b>náročnější</b>
<i>Hodnocení náročnosti zadání závěrečné práce.</i>	
Zadání bylo rozděleno do několika kroků, které měly studenta provést od teoretického základu až po konečnou implementaci. Vyžadovalo po studentovi samostudium nad rámec jeho dosavadních znalostí a značné množství vlastní iniciativy v seznámení se s používanými nástroji.	

<b>Splnění zadání</b>	<b>splněno s menšími výhradami</b>
<i>Posudte, 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>	
Zadání bylo formálně splněno ve všech bodech. Výhrady bych měl k finalizaci jeho navržených řešení, která nebyla dotažena do konce a v současném stavu není možné implementaci využít v systému MRS. Oceňuji ovšem snahu studenta splnit všechny body místo zanedbání některého z nich.	

<b>Aktivita a samostatnost při zpracování práce</b>	<b>C - dobře</b>
<i>Posudte, zda byl student během řešení aktivní, zda dodržoval dohodnuté termíny, jestli své řešení průběžně konzultoval a zda byl na konzultace dostatečně připraven. Posudte schopnost studenta samostatně tvůrčí práce.</i>	
Student pracoval z větší části samostatně, aktivně konzultoval svůj postup během práce a pracoval se zpětnou vazbou vedoucího. Vytkl bych pouze zanedbání náročnosti zadání, jehož řešení se plně věnoval až příliš pozdě což se projevilo nedotažením řešení posledních dvou bodů zadání do úspěšného konce.	

<b>Odborná úroveň</b>	<b>B - velmi dobře</b>
<i>Posudte úroveň odbornosti závěrečné práce, využití znalostí získaných studiem a z odborné literatury, využití podkladů a dat získaných z praxe.</i>	
Text je z hlediska etapy studia na dobré úrovni, student z literatury čerpal v oblasti nelineární optimalizace. Některé úvahy prezentované v teoretické části práce nejsou správné, nicméně v rovnicích matematicky reprezentovány dle literatury a skutečná implementace v kódu korektní. Výsledky jsou srozumitelně prezentovány.	

<b>Formální a jazyková úroveň, rozsah práce</b>	<b>A - výborně</b>
<i>Posudte správnost používání formálních zápisů obsažených v práci. Posudte typografickou a jazykovou stránku.</i>	
Práce je formálně na vysoké úrovni, na poskytnuté přílohy je v textu řádně odkazováno a části textu na sebe vhodně navazují.	

<b>Výběr zdrojů, korektnost citací</b>	<b>A - výborně</b>
<i>Vyjádřete se k aktivitě studenta při získávání a využívání studijních materiálů k řešení závěrečné práce. Charakterizujte výběr pramenů. Posudte, 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.</i>	
Student čerpal z doporučených pramenů a v textu je na ně řádně citováno. Student si aktivně hledal a předkládal zdroje	

potřebné k samostudiu a splnění zadání.

### 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.*

Přes výhrady k dosaženým výsledkům zmíněným výše oceňuji snahu studenta v seznámení se s pro něj novou problematikou. Implementace praktické části prezentovaná v práci je správná, nicméně vyžaduje další práci s použitými nástroji a hlubší pochopení jejich fungování.

### III. CELKOVÉ HODNOCENÍ A NÁVRH KLASIFIKACE

*Shrňte aspekty závěrečné práce, které nejvíce ovlivnily Vaše celkové hodnocení.*

Předloženou závěrečnou práci hodnotím klasifikačním stupněm **B - velmi dobře**.

Datum: 25.5.2022

Podpis: Ing. František Nekovář

## I. IDENTIFIKAČNÍ ÚDAJE

<b>Název práce:</b>	Odhad a optimalizace spotřeby energie během letu UAV
<b>Jméno autora:</b>	Miroslav Kovář
<b>Typ práce:</b>	bakalářská
<b>Fakulta/ústav:</b>	Fakulta elektrotechnická (FEL)
<b>Katedra/ústav:</b>	
<b>Oponent práce:</b>	Doc. Ing. Zdeněk Hurák, Ph.D.
<b>Pracoviště oponenta práce:</b>	Katedra řídicí techniky FEL ČVUT

## II. HODNOCENÍ JEDNOTLIVÝCH KRITÉRIÍ

<b>Zadání</b>	náročnější
<i>Hodnocení náročnosti zadání závěrečné práce.</i>	
Práce má dva dílčí cíle. <ul style="list-style-type: none"> <li>• První je návrh a softwarová implementace metody pro výpočet celkové energie potřebné pro sledování zadané trajektorie kvadkoptérou.</li> <li>• Druhým je výpočet energeticky optimální trajektorie při zadaných traťových bodech.</li> </ul> <p>Prvním dílčím cílem práce vyžadovala zvládnutí modelování kvadkoptér, druhým dílčím cílem vyžadovala zvládnutí optimálního řízení pro nelineární dynamické systémy. Obojí jsou dnes již velmi propracované disciplíny, pro které existuje obrovské množství lepších či horších a lépe či hůře popsanych a i softwarově implementovaných řešení, nicméně i přesto (a nebo právě proto) považuji zadání bakalářské práce za spíše náročné. Jsem přesvědčen, že bylo spíše i vhodnější pro diplomovou práci.</p>	

<b>Splnění zadání</b>	splněno s většími výhradami
<i>Posudte, 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>	
<p>Že bylo zadání pro daného studenta spíše nad jeho síly, se ukazuje i z (ne)dosažených výsledků.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pro první dílčí cíl sice nějaký výpočet spotřebované energie představuje, do jaké míry tento poskytuje přesný odhad však v práci nijak prokázáno není.</li> <li>• Druhý dílčí cíl nebyl dosažen vůbec. Student sice zkouší dva různé softwarové balíky pro generování optimálních trajektorií – jeden matlabský pro ryze offline použití na PC, druhý dokonce pro použití na palubní embedded platformě pro případné přepřeplování trajektorie – ani v jednom případě se mu však nedaří dostat uspokojivé výsledky.</li> </ul> <p>I přestože následující výhrada nemíří z větší části na studenta, přesto zmíním názor, že méně je někdy více a i "jen" první dílčí cíl, tedy opravdu pečlivé modelování, mohl být pro bakalářskou práci naprosto dostačující. Uvedením cíle druhého bylo i úsilí rozmělněno a ani ten první cíl tak nebyl pořádně dotažen. Kupříkladu v závěru zmiňované možné rozšíření práce formou experimentů mělo být – dle mého názoru – naprosto přirozenou součástí i této práce. Vskutku, v literatuře je možné najít práce, které energetickou spotřebu kvadkoptéry pro různé trajektorie porovnávají podle stavu nabití baterie na konci. Takto získaný vhled do problematiky tak mohl být daleko hlubší a užitečnější. A trůfám si odhadovat, že studenta to experimentování se skutečným dronem mohlo i více bavit.</p>	

<b>Zvolený postup řešení</b>	správný
<i>Posudte, zda student zvolil správný postup nebo metody řešení.</i>	
Práce byla omezena na výpočetní/simulační. To je sice naprosto v pořádku, nicméně jakákoliv experimentální složka by jistě pomohla získat další vhled. V druhé části práce – pro návrh optimálních trajektorií – jsou využívány softwarové řešiče (solvery) vyvinuté někým jiným (a dostupné ke stažení). To je sice naprosto v pořádku, nicméně se v práci ukázalo hlavní úskalí takového přístupu: v případě, že řešič neposkytuje uspokojivé řešení pro výchozí nastavení parametrů, bývá bez vzhledu do použitých metod téměř nemožné nakonfigurovat řešič tak, aby uspokojivé řešení našel. Práce s takovým řešičem	

se pak stává slepým prohledáváním prostoru jeho (hyper)parametrů.

## Odborná úroveň

D - uspokojivě

Posudte úroveň odbornosti závěrečné práce, využití znalostí získaných studiem a z odborné literatury, využití podkladů a dat získaných z praxe.

Viz dílčí komentáře v poslední sekci (Další komentáře a hodnocení).

## Formální a jazyková úroveň, rozsah práce

B - velmi dobře

Posudte správnost používání formálních zápisů obsažených v práci. Posudte typografickou a jazykovou stránku.

Také viz komentáře v poslední sekci.

## Výběr zdrojů, korektnost citací

B - velmi dobře

Vyjádřete se k aktivitě studenta při získávání a využívání studijních materiálů k řešení závěrečné práce. Charakterizujte výběr pramenů. Posudte, 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.

OK. Nicméně přesto jistě bylo možné pár dalších relevantních prací najít. Například práci/e R. Mahonyho na modelování kvadrokoptér, jak zmiňuji níže.

## 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.

Dílčí komentáře a výhrady (pořadí neodpovídá závažnosti). Některé z nich je možno položit i jako otázku u obhajoby, tak by student měl být připraven reagovat:

- V práci je používán výraz dron či UAV, přitom však zjevně se práce omezuje na jeden konkrétní typ, a sice čtyřrotorový vrtulník, kvadrokoptéra, či anglicky quadcopter, quadrotor. Toto na začátku mohlo být zdůrazněno, protože některé charakteristiky kvadrokoptér nejsou drony s pevným křídlem sdíleny. Kupříkladu pro ně neplatí, že by potřebovaly "vrtule, které se musí neustále točit, aby udržely stroj ve vzduchu".
- Vzhledem k častému nesprávnému používání termínu trajektorie a jeho záměně s termínem trať či dráha či cesta (anglicky path) by jistě bylo užitečné, kdyby byla na začátku práce podána definice trajektorie (a třeba právě v kontrastu k té trati). Pro jistotu čtenáře.
- Když už je v práci zmiňován vůbec nějaký souřadnicový (pozor, ne souřadný) systém (a nemyslím si, že to bylo nutné), tak pak by bylo vhodné být přesný, o jaký přesně jde, protože těch souřadnicových systémů relevantních pro modelování dynamiky letu je celá řada, viz Beard, Randal W., a Timothy W. McLain. Small Unmanned Aircraft. Princeton University Press, 2012.
- Jakkoliv rozumím, že studium dané problematiky dnes probíhá snad výhradně z anglicky psaných zdrojů, přesto bych však od zapálence do létajících prostředků očekával, že tu leteckou hantýrku zvládne i v češtině. Přiznávám ale současně, že si sám nejsem jistý, zda i pro kvadrokoptéry pro jejich symetrii je relevantní klasická letecká hantýrka podélný sklon, příčný náklon, kurz.
- To vysvětlení zmíněných tří úhlů mohlo být pečlivější. Pouze se píše, že jde vždy o natočení okolo os x, y a z, ale není už upřesněno, co jsou ty osy zač? Jsou to osy toho dosud jediného zmíněného světového souřadného systému? A nebo toho systému spojeného s kvadrokoptérou? Ale pak kterého? Na začátku sekvence těch tří rotací? Není to otázka z rozmaru, ty konvence pro definici Eulerových úhlů jsou skutečně různé.
- V rovnici (1) vidím, že matice/tenzor momentu (!) setrvačnosti je pouze diagonální - mimodiagonální členy jsou uvažovány nulové. Je to prakticky oprávněný předpoklad? Co členy  $I_{xz}$ ,  $I_{yz}$ ? Co musí platit, aby byly nulové?
- V češtině jsme se dohodli, že jsou to řídicí vstupy a nikoliv řídicí.
- V sekci o elektrickém motoru se dočítáme, že energie se rozptýluje v odporovém a indukčním vinutí motoru. Bylo by možná zajímavé takový motor společně na místě rozebrat a pokusit se tam najít vinutí indukční a pak vinutí odporové.
- Ve stejné sekci o motoru je pod vztahem (2.9) uváděn třecí moment motoru  $T_f$ . Co to přesně je a jaká je jeho role? Kdybychom například zanedbali všechny ostatní členy, dostáváme rovnost mezi proudem a touto konstantou  $T_f$ . Jak takovou rovnost interpretovat? Neříkám, že je to špatně, jen bych se o tomto modelu případně chtěl pobavit.

- Stále ještě u modelu motoru se píše, že za ustáleného proudu bude derivace nulová a tudíž člen obsahující indukčnost  $L$  v rovnici (2.10) bude možné vypustit. Co ale když ten proud ustálený nebude? A to při provádění různých manévrů, kdy se požadované otáčky motorů budou měnit, zjevně nebude. Co pak? Pak tedy tu indukčnost nadále uvažovat musíme?
- Při uvádění fyzikálních jednotek v LaTeXu bych doporučoval využívat balíku typu siunitx <https://ctan.org/pkg/siunitx>. Buď úplně ne skoro následuje odpovídající normy a výsledek je pohlednější.
- V textu se uvádí, že zrychlení potřebná pro výpočet celkové spotřebované energie, se dají získat derivací rychlostí. To je pravda. Nicméně v případě časových řad to není triviální. Naivní metoda spočívající v podělení rozdílu dvou sousedních hodnot délkou vzorkovacího intervalu je prakticky téměř nepoužitelná. Jak tedy jinak? A skutečně má cenu to zrychlení (za účelem výpočtu spotřeby) počítat?
- Pro vzorkování trajektorie pro vyhodnocení spotřebované energie je použita perioda 100 Hz. Proč takováto? Při vlastním návrhu optimální trajektorie je zvolena frekvence 15 Hz. Proč? Ta zdůvodnění těchto a podobných rozhodnutí při návrhu jsou tou nejdůležitější součástí samotného textu.
- Na obrázku 3.3 je zobrazena okamžitá spotřeba energie v závislosti na čase. Uváděna je v Joulech. Co to má znamenat?
- Jak vidíme i z obr. 3.5, spotřebovaná energie je poměrně přesně aproximovatelná lineární funkcí uběhlého času. Jaký z tohoto pozorování plyne závěr pro optimalizaci spotřeby energie? Bylo by velice užitečné takovou diskuzi během obhajoby realizovat.
- Mimochodem, co je tedy tím hlavním přispěvatelem do energetické spotřeby? Řekněme, že letová výška se nijak výrazně měnit nebude. Na čem pak ta spotřeba nejvíce záleží? To jsem se vlastně z práce nedozvěděl. Mimochodem, nikde v práci nevidím (pokud nepřehlídím) rychlosti letu. Podle literatury ten podíl různých složek celkových ztrátách i na té rychlosti závisí. Viz například Bangura, Moses, a Robert Mahony. „Nonlinear Dynamic Modeling for High Performance Control of a Quadrotor“. In Proceedings of Australasian Conference on Robotics and Automation, 10. Victoria University of Wellington, New Zealand, 2012. Mimochodem, tuto práci od renomovaných autorů (R. Mahony) bych výrazně více doporučil pro celou tu modelovací část.
- Při diskuzi výsledků poskytnutých solverem FALCON.m dochází student k závěru, že je "podivuhodné", že doba této trajektorie je výrazně delší než nějaká jiná (dřívější) trajektorie. To tedy ale mimo jiné znamená, že optimalizační solver bere ten časový horizont jako další optimalizační proměnnou. Tak však optimalizační úloha (5) formulována není, koncový čas tam mezi optimalizačními proměnnými uveden není. Takže jak je to?
- Stále ještě k výsledku z FALCON.m. Sice to díky srovnání celkových energií, že skutečně ta vypočítaná trajektorie není optimální, nicméně nejsem si tak jistý tím tvrzením pod obr. 4.2, že "obvykle platí, že čím déle UAV letí, tím vyšší má spotřebu energie". Je tomu skutečně tak? A kdy tomu tak není? Souvisí s ob-jeden-předchozím bodem.
- V hodnocení špatných výsledků FALCON.m se v práci píše, že "Obvykle program zahlásil, že optimalizace dosáhla do bodu místní neproveditelnosti (uvázla v nějakém lokálním minimu)". Předpokládám, že takto to hlášení ale nevypadalo, protože toto jsou dvě odlišné věci: uvíznutí v lokálním minimu je u minimalizace nekonvexní funkce (a to je ten případ) je přece něco odlišného od detekce "infeasibility".
- V závěru sekce o použití solveru FALCON.m student konstatuje, že za problémy mohly být "numerické nestability nějakých operací", ale že konkrétní zdroj problémů je obtížné zjistit, protože "se jedná o tzv. blackbox optimalizaci". To tedy nejedná. Pojem "blackbox optimalizace" není synonymem pro "nerozumím tomu, jak to vevnitř funguje", nýbrž je zavedeným technickým termínem pro konkrétní skupinu metod. Podle Alarie, Stéphane, Charles Audet, Aïmen E. Gheribi, Michael Kokkolaras, a Sébastien Le Digabel. „Two Decades of Blackbox Optimization Applications“. *EURO Journal on Computational Optimization* 9 (1. leden 2021): „Blackbox optimization (BBO) considers the design and analysis of algorithms for problems where the structure of the objective function and/or the constraints defining the set is unknown, unexploitable, or non-existent. The most frequent BBO situation arises when the evaluation of the objective and /or constraint functions involve the execution of a computer code or simulation“. Tedy rozhodně ne pro situaci z této bakalářské práce. Koneckonců i na začátku této kapitoly je podáván výčet schopností solveru FALCON.m, mezi než patří schopnost počítat Jacobiány, což je přímo ukázkovým využitím znalosti struktury kritériální funkce. Takže žádný blackbox.
- V sekci o optimalizaci v reálném čase student zmiňuje, že použil (další) konkrétní softwarový řešič/solver, tentokrát GRAMPC. Nabízí se otázka, proč právě tento. Prvotní odpovědí by sice samozřejmě mohlo být "proč ne?", ale jak se v této sekci ukazuje, ani s tímto solverem se uspokojivé řešení původně formulovaného problému najít nedaří (nakonec se podaří pouze zprovoznit demo od vývojářů softwaru, které také řeší úlohu plánování trajektorie, ale s jiným modelem a kritériem optimality). Jedno z možných inženýrských řešení by totiž mohlo spočívat ve vyzkoušení

dalšího jednoho nebo dvou solverů. Namátkou Acado <https://acado.github.io/>, které se v člancích o optimálním řízení kvadkoptér taky často objevuje.

- Dalším řešením problému by byla větší časová/studijní investice do konfigurace solverů. V této oblasti je rozhodně co studovat. Volba kolokační metody, počet diskretizačních bodů, zahušťování (remeshing), ... I proto jsem na začátku zmiňoval, že na bakalářskou práci to bylo příliš ambiciózní.
- Jsem přesvědčen, že v těchto závěrečných pracích se mají i v popisných částech zmiňovat pouze skutečnosti, které jsou relevantní pro vlastní práci, protože jinak je to pouze "vata". Bylo nutné při zmínce o použití solveru GRAMPC uvádět, že "se skládá z rozšířeného Lagrangeova schématu ve spojení s metodou přizpůsobeného gradientu"?
- Na závěr výhrada k obhajobě schopnosti softwaru GRAMPC naplánovat trajektorii pouze pro jeden cílový bod trasy. V textu se píše, že to není žádný problém, protože stejně bude kvadkoptéra létat od bodu k bodu. Připomenu při této příležitosti, že taková strategie může vést na "lakomé" (greedy) řešení, kdy nebude plně využita dynamika kvadkoptéry. Ale zda toto bude omezující nebo ne, to bude záležet na konkrétních podmínkách.

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

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

Závěrem: student se při práci na tomto projektu nepochybně kus práce odvedl, nějakých dílčích výsledků dosáhl, třebaže nedotaženosti převažují. Domnívám, že když už student narazil na problémy v optimalizační části, mohl se přece jen pokusit ještě více se do problematiky ponořit a pokusit se aspoň některé problémy vyřešit. Třebas i s pomocí konzultace někoho, kdo se problematice optimalizace a/nebo optimálního řízení věnuje. Odbýt nekonzistentní výsledky solveru konstatováním, že jsou podivuhodné, a že jde o blackbox metody (což není pravda), není přístup hodný inženýra (inženýra coby profesora, nikoliv titulu). S ohledem na komplexnost celé problematiky a omezenou časovou dotaci pro bakalářskou práci však připouštím, že na toto už studentovi nemusela zůstat kapacita.

U obhajoby by se mohl student vyjádřit k některým (na místě komisí či přímo oponentem vybraným) otázkám položeným v předchozí sekci.

Předloženou závěrečnou práci hodnotím klasifikačním stupněm C - dobře. Pokud bych však věděl, že se student dané problematice věnoval už i v rámci předcházejícího individuálního projektu a ne až pouze v tomto letním semestru, navrhol bych hodnocení o stupeň horší.

Datum: 2.6.2022

Podpis: