

Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra řídicí techniky

Systémy řízení STOL prostředků s distribuovanými pohony

Martin Bílík

Vedoucí: Doc. Ing. Martin Hromčík Ph.D.
Obor: Kybernetika a robotika
Studijní program: Kybernetika a robotika
Květen 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Bílík** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **492175**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra řídicí techniky**
Studijní program: **Kybernetika a robotika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Systémy řízení STOL prostředků s distribuovanými pohony

Název bakalářské práce anglicky:

Control of STOL aircraft using distributed propulsion systems

Pokyny pro vypracování:

Projekt pojednává o možnosti řízení letu ovlivňováním proudění vzduchu okolo profilu křídla pomocí distribuovaných pohonů. Cílem projektu je analýza systémů řízení náklonu a kurzu letadla změnou vzlaku a momentu síly vyvolanými pohony upevněnými na křídle. Motivace k tomuto projektu je redukce rozměrů řídicích ploch nebo jejich úplná eliminace. Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s principem distribuovaných pohonů a aerodynamikou křídla.
2. Připravte model křídla s distribuovanými pohony. Zkoumejte na něm chování v závislosti na změně otáček vrtulí pohonů.
3. Zprovozněte model letadla s distribuovanými pohony.
4. Proveďte experimentální vyhodnocení přínosů distribuovaných pohonů pro řízení letadla.

Seznam doporučené literatury:

[1] VECHTEL, Dennis a Jan-Philipp BUCH. Aspects of yaw control design of an aircraft with distributed electric propulsion. CEAS Aeronautical Journal. 2022, 13(4), 847-860. ISSN 1869-5582. Dostupné z: doi:10.1007/s13272-022-00595-1

[2] SHI, Jin, Jun ZHOU a Liaoni WU. Aerodynamic Investigation of a General Aviation Aircraft with Distributed Electric Propulsion. 2021 IEEE International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications (AEECA). IEEE, 2021, 2021-8-27, 672-676. ISBN 978-1-6654-3561-1. Dostupné z: doi:10.1109/AEECA52519.2021.9574397

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **01.02.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2023**

Platnost zadání bakalářské práce:

do konce letního semestru 2023/2024

doc. Ing. Martin Hromčík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Děkuji doc. Ing. Martinu Hromčíkovi, PhD za odborné vedení a vstřícnost při konzultacích. Dále bych rád poděkoval mému otci za podporu při psaní bakalářské práce.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně, a že jsem uvedl veškerou použitou literaturu.

V Praze, 25. května 2023

Abstrakt

Tato práce poskytuje teoretický úvod k letadlům s distribuovanými pohony, jejich varianty a využití. Cílem mé práce je sestavit testovací křídlo s distribuovaným pohonem. Dále navrhnout a sestavit stojan, který měří zatáčení a náklon křídla. Součástí této práce je i ověření vlivu vrtulí s různým průměrem na naklání křídla při rozdílných otáčkách motorů na polovinách křídla.

Klíčová slova: distribuované pohony, křídlo, vrtule, Arduino

Vedoucí: Doc. Ing. Martin Hromčík
Ph.D.

Katedra řídicí techniky,
Fakulta elektrotechnická,
České vysoké učení technické v Praze,
Karlovo náměstí 13,
121 35 Praha 2,
Česká republika

Abstract

This thesis provides a theoretical introduction to distributed propulsion aircraft, their variants and use. The goal of my work is to build a test wing with distributed propulsion. Next, design and assemble a stand that measures yaw and roll of the wing. Part of this work is the verification of the influence of propellers with different diameters on wing tilting at different engine speeds on the wing halves.

Keywords: distributed propulsion, wing, propeller, Arduino

Title translation: Systems of steering of STOL aircraft with distributed propulsions

Obsah

1 Teoretický úvod	1	4.3 Motory a jejich ovládání	15
1.1 Distribuované pohony	1	5 Ověření náklonu křídla při různých otáčkách vrtulí na polovinách křídla a srovnání náklonu při různých průměrech vrtule	19
1.1.1 Výhody distribuovaných pohonů	3	5.1 Ověření náklonu v ruce	19
1.1.2 Výzkum v oblasti distribuovaných pohonů	3	5.1.1 Cíl pokusu	19
1.2 Prostředky STOL	4	5.1.2 Provedení	19
1.3 Aerodynamika křídla	4	5.1.3 Závěr ověření náklonu v ruce	20
1.3.1 Vznik vztlaku na profilu křídla	4	5.2 Srovnání vlivu různých průměrů vrtulí na náklon křídla	20
1.3.2 Koncové víry	5	5.2.1 Cíl a předpokládaný výsledek pokusu	20
2 Cíle práce	7	5.2.2 Závěr srovnání vrtulí o různém průměru	21
3 Stavba stojanu pro měření zatáčení a náklonu křídla	9	6 Výsledky	23
3.1 Požadavky na stojan a jeho účel .	9	7 Závěr	25
3.2 Stavba stojanu	9	Literatura	27
4 Sestrojení křídla s distribuovaným pohonem	13	A Elektronické přílohy	29
4.1 Požadavky a účel	13		
4.2 Stavba křídla	13		

Obrázky

1.1 Nákres popisující nasávání mezní vrstvy u Cross-Flow konfigurace [3]	2	4.6 Univerzální plošný spoj s mosfety pro 4 motory.	16
1.2 X-57 Maxwell [2]	2	4.7 Schéma propojení Arduino Uno s PWM-Servo mini shield [4]	17
1.3 Znázornění nejlepší konfigurace rotací vrtulí [7]	4	4.8 Znázornění otáček motorů s 3"vrtulí.	18
1.4 Znázornění aerodynamické síly[6]	5	4.9 Znázornění otáček motorů s 5.1"vrtulí.....	18
1.5 Koncové víry na křídlech letadla[10].....	6	4.10 Znázornění otáček motorů s 7"vrtulí.	18
3.1 Základ stojanu(vlevo) a sestavený stojan(vpravo).	10	5.1 Srovnání průběhů zatáčení a naklánění křídla	21
3.2 Magnetický rotační enkodér AS5600	11		
4.1 Prvotní návrh držáku s umístěním motoru pod křídlem	14		
4.2 Model držáku(vlevo) a složený držák(vpravo)	14		
4.3 Levá polovina křídla shora(vlevo) a zesponu(vpravo).	15		
4.4 Stejnoseměrný elektromotor FOXY 250 [1].....	15		
4.5 Schéma zapojení pro jeden motor	16		

Tabulky

4.1 Parametry motoru FOXY 250. . .	16
4.2 Specifikace PWM-Servo mini shieldu.....	17
5.1 Parametry testovaných vrtulí. . .	20

Kapitola 1

Teoretický úvod

1.1 Distribuované pohony

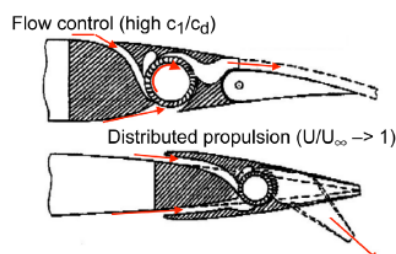
V současné době je kladen velký důraz na snížení emisí a ekologii. Proto některé země, společnosti a organizace zformulovaly cíle v této oblasti. Například International Civil Aviation Organization chce docílit snížení emisí uhlíku o 50% do roku 2050, NASA chce docílit snížení hluku o $81dB$, snížení emisí NO_x o 80% a snížení spotřeby paliva o 70% do roku 2030. Evropská Unie chce docílit snížení emisí NO_x o 90% , emisí CO_2 o 75% a snížení hladiny hluku o 65% do roku 2050[7].

Jeden ze způsobů, jak dosáhnout menší produkce emisí, snížení spotřeby paliva a hluku, je systém distribuovaných pohonů. Jedná se o takové uspořádání pohonů, že vzduch proudící z nich, obtéká nosný povrch letounu. Vzduch proudící z pohonů je rozprostřený po celé délce křídla a zvyšuje koeficient zdvihu letadla. To umožňuje zmenšení plochy křídla, což má za následek snížení hmotnosti letounu a aerodynamického odporu[8].

Termín distribuované pohony není striktně definován, a proto za letadlo s distribuovanými pohony považujeme takové letadlo, které je vybaveno motory rozmístěnými tak, že letadlo benefituje z proudu vzduchu hnaného přes jeho nosné plochy.

Jsou zkoumány různé konfigurace distribuovaných pohonů, a to například:

"**Cross-Flow Fan**" je konfigurace, která využívá pohonu, umístěného uvnitř křídla. Nasává mezní vrstvu z horní a spodní strany křídla a vyfukuje ji z odtokové hrany. Kvůli malému výkonu a obtížné realizaci pohonu uvnitř křídla má tento koncept využití spíše u malých bezpilotních letounů[3].



Obrázek 1.1: Nákres popisující nasávání mezní vrstvy u Cross-Flow konfigurace [3]

Více samostatných motorů. Jedná se o letadlo vybavené motory, které jsou na sobě nezávislé a jsou rozmístěné po aerodynamické ploše letadla tak, aby proud vzduchu, který z nich letí, obtékal nosné plochy[3].

Příkladem takového letadla s distribuovanými pohony je X-57 Maxwell, což je experimentální letadlo vyvíjené NASA. X-57 Maxwell je postaven na základech letounu Tecnam P2006T se zmenšenou plochou křídel. Byl vybaven 2 většími elektromotory na koncích křídel a 12 menšími elektromotory se sklopnou vrtulí, které zajišťují vyšší vztlak při vzletu a přistání [5].



Obrázek 1.2: X-57 Maxwell [2]

Více pohonů poháněných jedním motorem. Při této konfiguraci je letadlo vybavené větším množstvím pohonů, které jsou poháněny několika motory. Pohony mohou být poháněny buď horkými plyny letícími z motoru, nebo mohou být s motorem spojeny mechanicky nebo motor generuje elektrický proud, kterým jsou napájeny elektrické pohony, zajišťující let letadla[3].

V této práci se budu zabývat pouze elektrickými distribuovanými pohony, umístěnými před náběžnou hranou křídla.

1.1.1 Výhody distribuovaných pohonů

System distribuovaných pohonů je zkoumány, právě díky tomu, že slibuje do budoucna mnoho výhod, i když do značné míry počítá s využitím elektrických pohonů a v některých případech i supravodičů [3]. Hlavními výhodami jsou:

Snížení spotřeby paliva díky možnosti zmenšení ploch křídel, a tedy snížení hmotnosti letadla.

Zkrácení vzletové a přistávací dráhy díky většímu vztlaku působícímu na křídla, který umožňuje vzlet a přistání při nižších rychlostech.

Snížení hluku v případě elektromotorů, nebo zabudováním motoru do vnitřku křídla.

Jednodušší opravy jednotlivých motorů díky jejich menší velikosti a hmotnosti [3].

1.1.2 Výzkum v oblasti distribuovaných pohonů

V oblasti distribuovaných pohonů Jin Shi, Jun Zhou a Liaoni Wu zkoumali vliv snížení počtu motorů na vztlakovou sílu působící na křídlo. Simulovali letoun se 7 motory na jednom křídle a poté letoun s 5 motory na jednom křídle. Při snížení počtu motorů zachovali jejich celkovou sílu, to znamená, že zvětšili průměr vrtulí a motory měly nižší otáčky. Došli k závěru, že vztlaková síla působící na letadlo s menším počtem motorů a větším průměrem vrtulí je nižší, protože vrtule ženou vzduch kolem křídla pomaleji a pouze menší část tohoto vzduchu proudí v těsné blízkosti křídla [7].

Průměrem vrtule, který by měl být použit na ofukování křídla se zabývali Jeffrey K. Viken, Sally A. Viken a kol., kteří zkoumali poměr průměru vrtule a tětiny křídla. Pomocí programu FUN3D zkoumali vliv vrtulí s poměrem 0.5, 1 a 2. Nejlepší výsledek byl zjištěn u průměru vrtule s poměrem 1 [9].

Dalším faktorem ovlivňujícím chování křídla s distribuovanými pohony je směr rotace vrtulí. Jin Shi, Jun Zhou a Liaoni Wu ve své práci zmiňují, že nejlepší konfigurací pro směr rotace vrtulí distribuovaných pohonů je taková konfigurace, kdy se vrtule na kraji křídel otáčejí proti směru koncových vírů a další vrtule se otáčejí tak, aby se vrtule vedle sebe točily vždy opačným směrem

[7].



Obrázek 1.3: Znázornění nejlepší konfigurace rotací vrtulí [7]

1.2 Prostředky STOL

STOL je zkratka anglického short take-off and landing, v překladu: "krátký vzlet a přistání". Touto zkratkou se označují letadla s kratší vzletovou a přistávací dráhou, než mají běžná letadla.

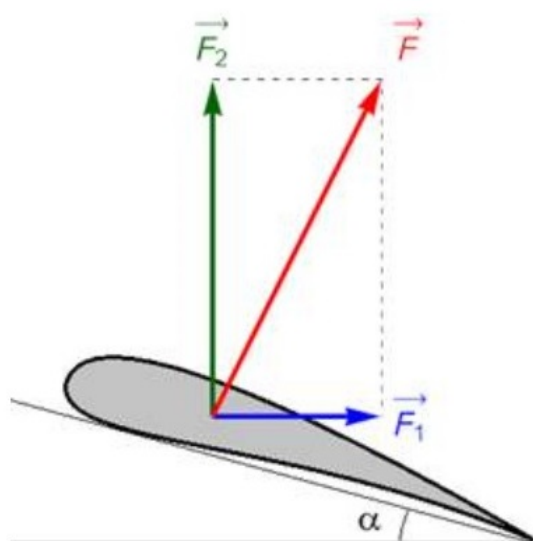
1.3 Aerodynamika křídla

1.3.1 Vznik vztlaku na profilu křídla

Na křídlo působí aerodynamická síla \vec{F} , která se skládá ze složek \vec{F}_1 a \vec{F}_2 . \vec{F}_1 je odporová aerodynamická síla, která směřuje proti směru letu letadla a vypočte se jako:

$$F_1 = \frac{1}{2} C_1 S \rho v^2 \quad (1.1)$$

kde C_1 je součinitel odporu, který se odvíjí od parametrů křídla a úhlu náběhu α , v je rychlost letadla, S je čelní průřez křídla a ρ je hustota vzduchu.



Obrázek 1.4: Znázornění aerodynamické síly[6]

\vec{F}_2 je vztlaková aerodynamická síla, která se vypočte podle vzorce:

$$F_2 = \frac{1}{2} C_2 S \rho v^2 \quad (1.2)$$

kde C_2 je součinitel vztlaku[6] a S je plocha křídla.

■ 1.3.2 Koncové víry

Koncové víry vznikají na koncích křídla s konečným rozpětím. Během proudění vzduchu kolem profilu křídla vzniká pod křídlem přetlak a nad křídlem podtlak. Na konci křídel dochází k vyrovnávání tlaků a vzduch z pod křídla se snaží dostat nad křídlo. Toto vyrovnávání tlaků na koncích křídel vytváří víry a ty jsou zdrojem indukovaného odporu.



Obrázek 1.5: Koncové víry na křídlech letadla[10].



Kapitola 2

Cíle práce

1. Seznámit se s principem distribuovaných pohonů a aerodynamikou křídla.
2. Navrhnout a sestrojít stojan k měření náklonu a zatáčení testovacího křídla.
3. Připravit model křídla s distribuovaným pohonem.
4. Ověřit vliv změny velikosti vrtulí na náklon křídla.
5. Vyhodnocení splnění cílů.

Kapitola 3

Stavba stojanu pro měření zatáčení a náklonu křídla

3.1 Požadavky na stojan a jeho účel

Stojan slouží k měření zatáčení a naklání křídla, musí mít tedy dva stupně volnosti. Dalším požadavkem je možnost zatáčení a náklon měřit, a proto bude stojan vybavený senzory pro snímání pohybu ve dvou osách. Další funkcí stojanu by měla být možnost aretace jednotlivých os otáčení.

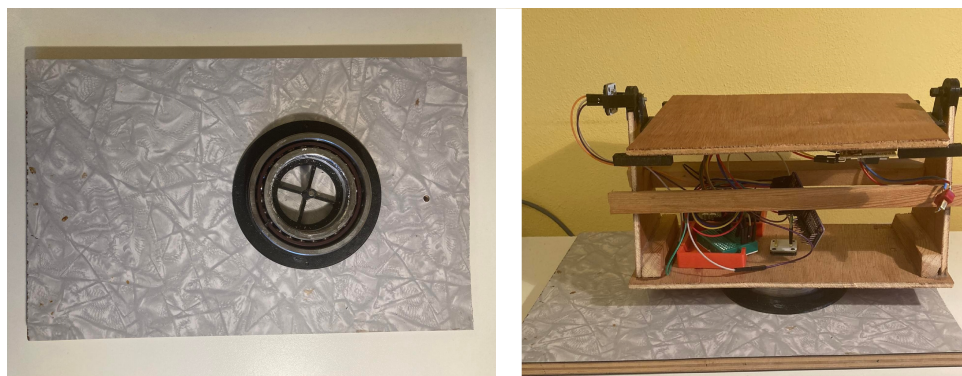
3.2 Stavba stojanu

Jako základnu stojanu jsem se rozhodl použít dřevěnou desku o šířce 21cm a délce 34cm . Pro možnost zatáčení jsem použil ocelové ložisko o vnějším průměru 9cm a vnitřním průměru 6cm . Toto ložisko jsem umístil do objímky vytištěné 3D tiskem a obojí jsem přilepil na základnu stojanu.

Další část stojanu, která se otáčí na již zmíněném ložisku jsem slepil z překližky a vyztužil dřevěnými hranoly. Poslední částí stojanu je překližková deska, ke které se připevní křídlo. Tato deska je pomocí 3D vytištěných dílů připevněna k ložiskům, která jsou umístěna na vrcholu dřevěné konstrukce a zajišťují tak možnost pohybu ve směru naklání. Křídlo se ke stojanu poutá

gumovým svazkem.

Aretaci zatáčení jsem vyřešil tak, že jsem vyvrtal díru do desky základu stojanu a do spodní desky otočné části stojanu. Do těchto otvorů se vkládá aretační kolík, který zamezí otáčení stojanu. Druhou osu je možné aretovat pomocí hranolu, který se vsune pod vrchní desku stojanu.

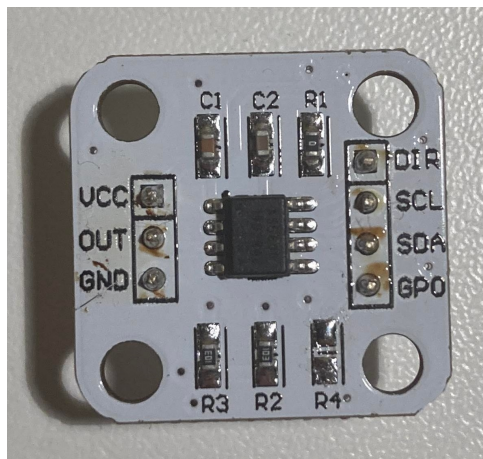


Obrázek 3.1: Základ stojanu(vlevo) a sestavený stojan(vpravo).

Pro snímání úhlu zatočení a náklonu jsem nejprve zvolil potenciometry s hodnotou $10k\Omega$, ale při zkoušení jsem zjistil, že jsou příliš tuhé na otáčení a mohly by ovlivňovat pohyby křídla. Pro měření jsem použil magnetické rotační enkodéry s Hallovou sondou (obr.3.2), protože díky nim mohu snímat pohyb křídla na stojanu, aniž by ho senzory ovlivňovaly.

Použité enkodéry jsou vybaveny snímacím čipem AS5600 a pracují na napájecím napětí $3.3V$ nebo $5V$. Sensory snímají polohu v rozsahu 360 stupňů s 12 bitovým rozlišením. Jejich výhodou je, že hodnotu výstupu lze odečítat pomocí analogového výstupu/PWM nebo pomocí komunikačního rozhraní I2C. Rozhraní I2C jsem nemohl použít, protože senzory mají stejnou adresu pro komunikaci pomocí tohoto rozhraní a tato adresa nelze změnit. Proto jsem využil možnost odečítání analogových hodnot ze senzoru. Pro zprovoznění této možnosti je odpájen rezistor R_4 na destičce plošného spoje.

Využitím analogového výstupu jsem zhoršil rozlišení senzoru, protože Arduino Uno, které zpracovává data ze sensorů a ovládá motory, má pouze 10 bitové AD převodníky, kterými měří úroveň napětí na jeho vstupech. Pro měření náklonu se ukázala citlivost senzoru jako nedostatečná, a proto jsem se rozhodl pro napájení senzoru $5V$ místo $3.3V$. Aby bylo možné provozovat senzor na $5V$, bylo nutné odpájet rezistor R_1 na plošném spoji senzoru. Rozsah výstupního napětí senzoru se změnil z $0 - 3.3V$ na $0 - 5V$. Díky tomu, že AD převodníky Arduina Uno měří v rozsahu $0 - 5V$ jsem mohl využít celý rozsah snímání napětí Arduinem Uno a měřené hodnoty tak mají větší přesnost.



Obrázek 3.2: Magnetický rotační enkodér AS5600

Pro senzory jsem vymodeloval a vytiskl úchyty pomocí 3D tisku. Magnety, jejichž magnetické pole senzory snímají jsem umístil do os otáčení stojanu. Magnet pro snímání úhlu zatočení je vidět na obrázku 3.1, kde je umístěný uprostřed ložiska.

Uvnitř stojanu je prostor pro uložení elektroniky, potřebné pro vyhodnocování měření a ovládání motorů na křídle.

Kapitola 4

Sestrojení křídla s distribuovaným pohonem

4.1 Požadavky a účel

Pro měření vlivu distribuovaného pohonu na křídlo jsem potřeboval křídlo s vhodným profilem, vhodný distribuovaný pohon křídla a elektroniku, sloužící k ovládání pohonu a sbírání dat od senzorů na měřícím stojanu.

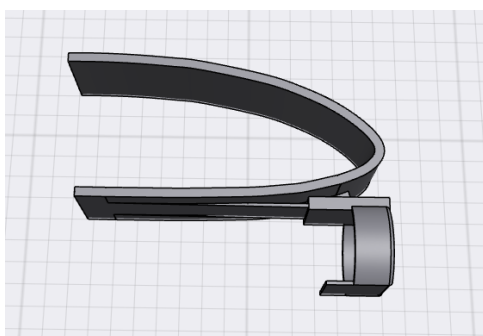
4.2 Stavba křídla

Využil jsem křídlo ze stavebnice polystyrenového letounu DHC-2 Beaver zakoupenou v modelářství. Křídlo je dlouhé 140cm a široké 20.5cm. Spodní strana křídla je rovná a tloušťka profilu je 3cm.

Křídlo jsem sestavil podle návodu a zalepil do něho uhlíkové vlákno jako výtuhu na spodní straně křídla. Po osazení křídla motory se křídlo začalo prohýbat, a proto jsem do horní strany zalepil druhou uhlíkovou výtuhu. Se dvěma uhlíkovými výtuhami se křídlo prohýbá jen velmi nepatrně.

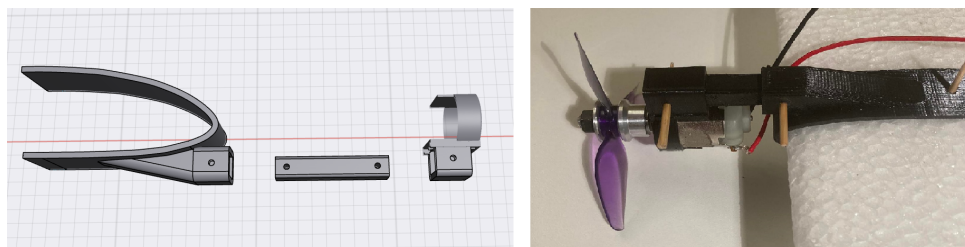
Na křídlo jsem umístil 8 stejnosměrných elektromotorů FOXY 250.

Uchycení motorů na křídlo jsem zrealizoval pomocí 3D vytištěných držáků. Držák je vymodelovaný tak, aby přiléhal na náběžnou hranu a ke křídlu je připevněn bambusovým kolíčkem. Držáky jsem na křídlo nepřipevnil natrvalo záměrně, kdyby později bylo třeba měnit polohu držáků nebo vyměnit držáky samotné.



Obrázek 4.1: Prvotní návrh držáku s umístěním motoru pod křídlem

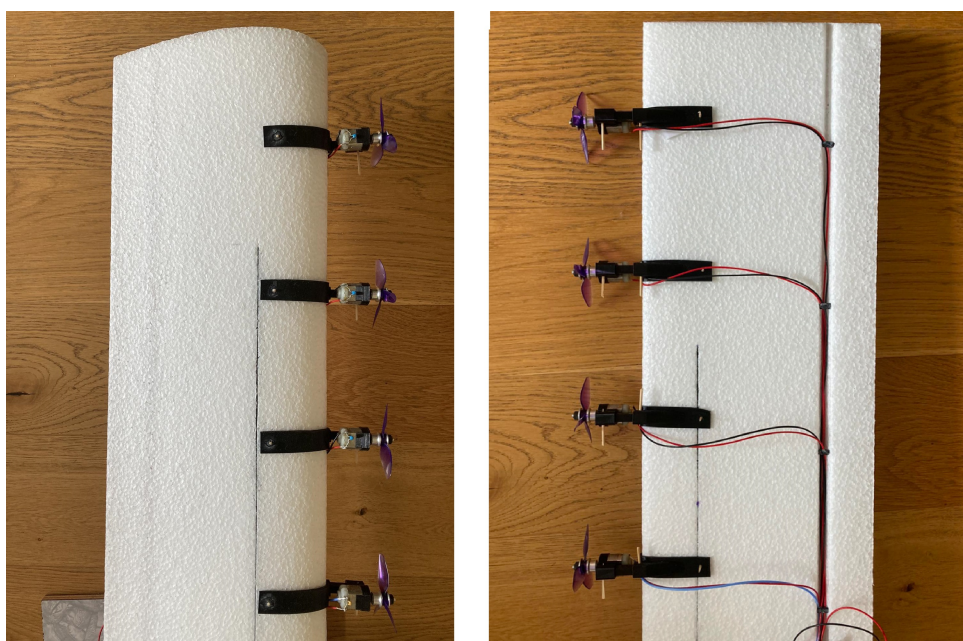
První návrh držáků byl vytvořen tak, že motor byl uchycen pod křídlem a vrtule byla těsně před náběžnou hranou křídla. Po konzultaci s vedoucím práce jsem držáky přepracoval tak, aby motory byly před křídlem a aby šla nastavovat poloha motorů před náběžnou hranou křídla.



Obrázek 4.2: Model držáku(vlevo) a složený držák(vpravo)

Držáky se skládají ze tří kusů, které se upevňují bambusovými kolíčky. Výměnou prostředního dílu držáku za jinak dlouhý díl lze měnit vzdálenost motoru od náběžné hrany.

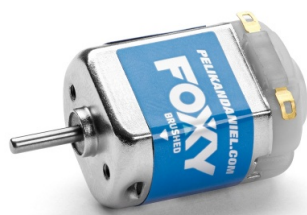
Křídlo má křidélka, která mají sloužit k řízení původního modelu letadla. Drážku křidélka jsem využil k vedení kabelů od motoru, aby pod křídlem visela co nejmenší plocha kabelů.



Obrázek 4.3: Levá polovina křídla shora(vlevo) a zespodu(vpravo).

4.3 Motory a jejich ovládání

Pro pohon křídla jsem vybral stejnosměrné motory FOXY 250, protože je možné je spouštět pomocí tranzistorů, které zabírají méně místa než regulátory střídavých motorů. Dalším rozhodujícím faktorem pro výběr těchto motorů byla jejich nízká hmotnost 22g a jejich nízká cena v kombinaci s nízkou cenou za tranzistory při použití místo regulátoru.

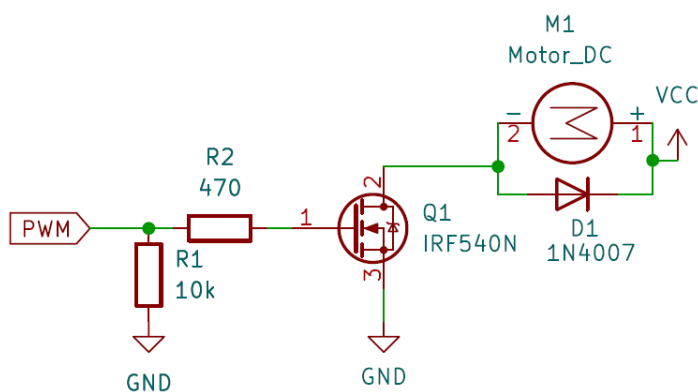


Obrázek 4.4: Stejnosměrný elektromotor FOXY 250 [1]

Motory jsou spínané pomocí výkonových mosfetů IRF540N, které mohou spínat napětí až 100V a proud až 28A, což je vzhledem k napájecímu napětí motorů plně postačující.

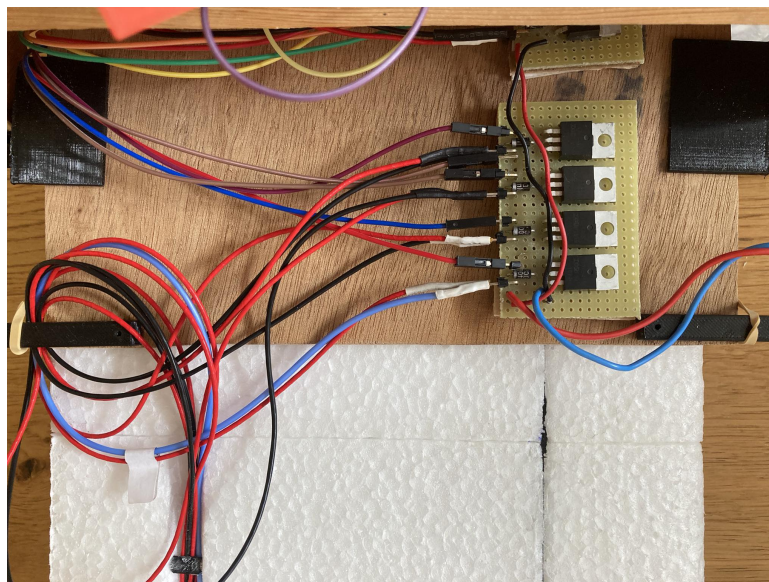
jmenovité napětí	7.2 V
provozní rozsah napětí	3.7 - 8.4 V
otáčky při jm. napětí	15000 ot./min
průměr hřídele	2 mm
hmotnost	22 g

Tabulka 4.1: Parametry motoru FOXY 250.



Obrázek 4.5: Schéma zapojení pro jeden motor

Každý motor je ovládán jedním PWM výstupem a je zapojen podle výše uvedeného schématu. Součástky jsem zapájel na univerzální plošný spoj, který jsem přilepil na spodní stranu desky stojanu. Díky tomuto umístění se neohýbají kabely od motorů při pohybu křídla a méně tak dochází k ovlivňování pohybu křídla.



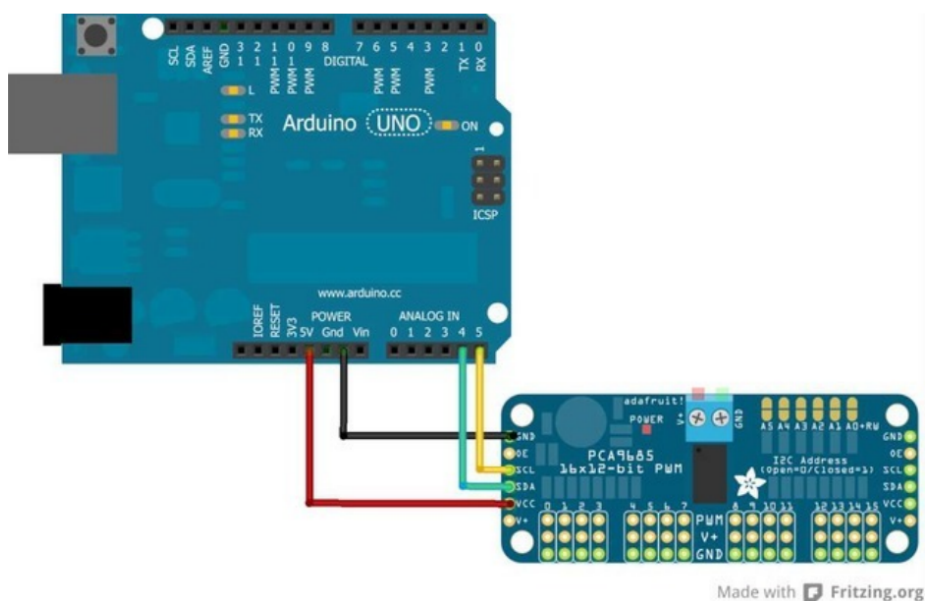
Obrázek 4.6: Univerzální plošný spoj s mosfety pro 4 motory.

Pro ovládání motorů jsem použil klonu Arduina Uno, což je prototypová

platforma s mikrokontrolerem ATmega. Prože Arduino Uno nemá 8 PWM výstupů, použil jsem také desku s 16 PWM výstupy, která s Arduinem komunikuje pomocí I2C rozhraní. Tato deska je u prodejce pojmenovaná jako 16-kanálový 12-bit PWM-Servo mini shield I2C PCA9685.

vstupní napětí	3.3V,5V
výstupní napětí	do 6V
kontroler	PCA9685
typ rozhraní	I2C

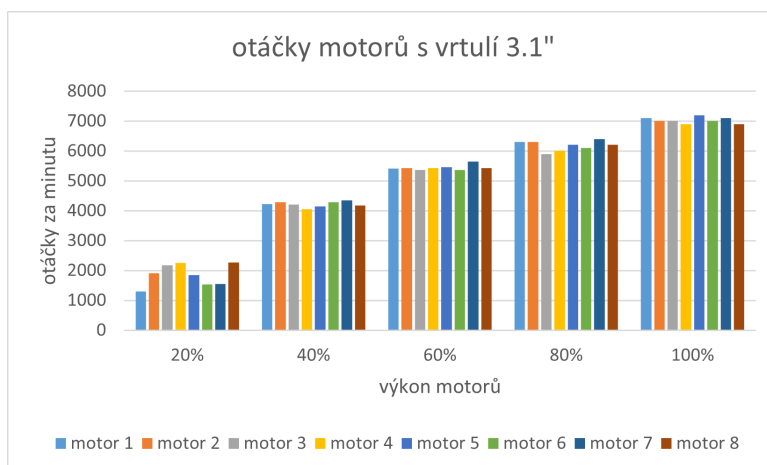
Tabulka 4.2: Specifikace PWM-Servo mini shieldu.



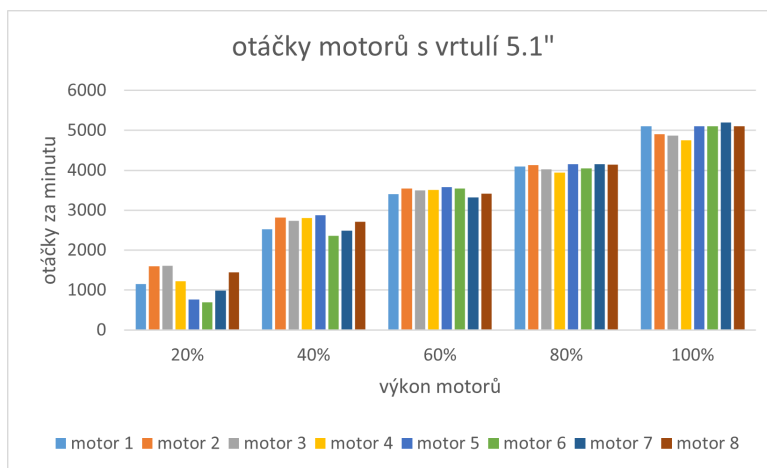
Obrázek 4.7: Schéma propojení Arduino Uno s PWM-Servo mini shield [4]

Pomocí otáčkoměru jsem změřil otáčky vrtulí různých rozměrů při různých výkonech motoru. Parametry vrtulí, které jsme použili jsou v tabulce 5.1. Z grafů 4.8, 4.9, 4.10 je vidět, že při nízkém výkonu motorů jsou značné rozdíly mezi otáčkami jednotlivých motorů. Při vyšším výkonu tento rozdíl klesá. Motory v tabulce jsou číslovány zleva doprava při pohledu na křídlo zepředu.

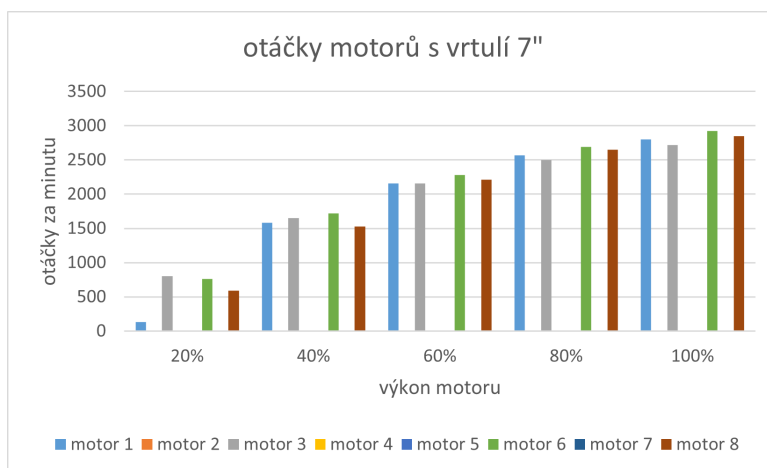
Pro napájení motorů jsem použil Li-Po baterii s napětím 7.4V.



Obrázek 4.8: Znázornění otáček motorů s 3"vrtulí.



Obrázek 4.9: Znázornění otáček motorů s 5.1"vrtulí.



Obrázek 4.10: Znázornění otáček motorů s 7"vrtulí.

Kapitola 5

Ověření náklonu křídla při různých otáčkách vrtulí na polovinách křídla a srovnání náklonu při různých průměrech vrtule

5.1 Ověření náklonu v ruce

5.1.1 Cíl pokusu

Ověřit, zda se křídlo bude naklánět, pokud se vrtule na jedné polovině křídla budou točit rychleji, než na druhé polovině.

5.1.2 Provedení

Abych mohl měnit výkon motorů, aniž bych musel měnit program v Arduinu, využil jsem modelářskou soupravu na dálkové ovládání. Příjímač jsem připojil k Arduinu a Arduino jsem naprogramoval (`dalkove_ovladani.ino`) tak, aby vyčítalo signály z vysílače a podle signálů upravovalo výkon motorů.

Jedna páka vysílače sloužila k přidávání výkonu na všech motorech současně a druhou pákou se zvyšoval výkon na jedné polovině křídla a na druhé se souměrně snižoval.

Pokus jsem provedl tak, že jsem v jedné ruce držel křídlo a druhou rukou jsem vysílačem měnil výkon motorů. Tento pokus ověřil, že pokud vrtule na jedné polovině křídla mají vyšší otáčky než na druhé, tato polovina křídla se nadzdvihává, a tedy dochází k náklonu křídla.

■ 5.1.3 Závěr ověření náklonu v ruce

Tento jednoduchý experiment potvrdil, že pokud na jedné polovině křídla mají vrtule vyšší otáčky, křídlo se začne naklánět. Při srovnání tendence křídla zatáčet a naklánět se, má křídlo výrazně větší snahu zatáčet než klonit.

■ 5.2 Srovnání vlivu různých průměrů vrtulí na náklon křídla

■ 5.2.1 Cíl a předpokládaný výsledek pokusu

Cílem tohoto pokusu je porovnat náklon křídla při stejném úhlu zatočení pro různé průměry vrtulí. Motory jsem zapojil tak, aby se vrtule vedle sebe vždy točily opačným směrem a vrtule na koncích křídla se otáčely proti směru koncových vírů 1.3.2.

Předpoklad tohoto pokusu je takový, že pro zatočení křídla o konstatní úhel budou mít menší vrtule vyšší otáčky, a tedy poženou vzduch kolem křídla rychleji. U vrtulí s největším testovaným průměrem se předpokládá nejmenší naklání křídla, protože kvůli velikosti vrtulí se na křídlo vejdou pouze 4 vrtule, bude ofukována menší část křídla, a tedy na křídle bude vznikat menší vztlačová síla, která závisí na rychlosti vzduchu obtékajícího křídlo.

průměr vrtule [palce]	počet vrtulí na křídle	počet listů vrtule
3	8	3
5.1	8	3
7	4	3

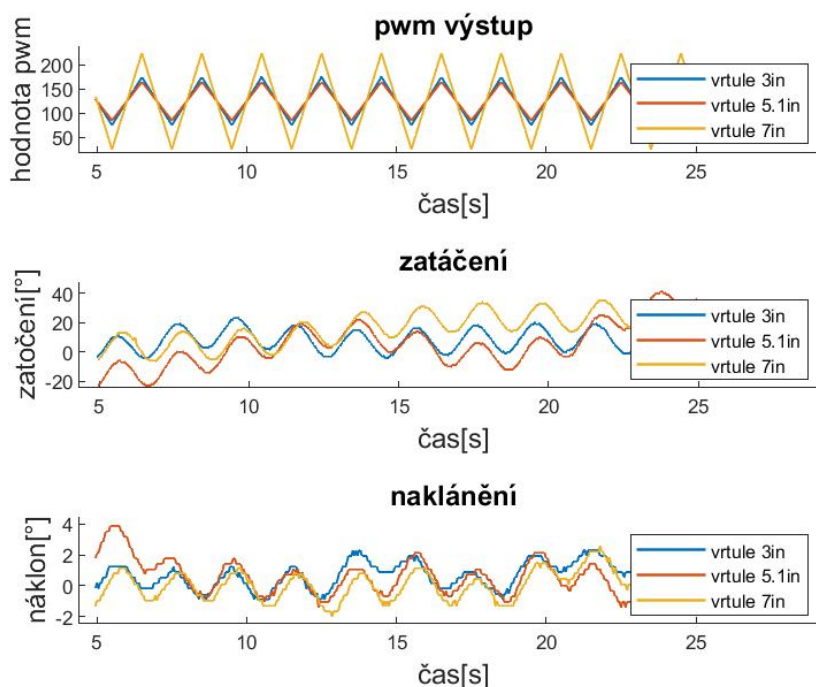
Tabulka 5.1: Parametry testovaných vrtulí.

Napsal jsem program pro Arduino (mereni_naklonu.ino) tak, aby se na jedné polovině křídla otáčky zvyšovaly a na druhé polovině křídla snižovaly o

konstatní hodnotu. Pro každou velikost vrtule jsem našel vyhovující konstatní hodnotu tak, aby křídlo zatáčelo o stejný úhel jako pro konfigurace s jinými velikostmi vrtulí.

Zatáčení křídla bylo tedy stejné pro všechny velikosti vrtulí, cílem bylo změřit náklon křídla pro různé průměry vrtulí a výsledky srovnat.

Data měření jsem získal tak, že Arduino posílalo data ze senzorů na stojanu na seriovou linku. Dále jsem napsal program pro počítač v Pythonu (cteni_ze_seriove_linky.py), který vyčítal data ze seriové linky a ukládal je do textového souboru. Potom jsem data načtl v Matlabu a sestavil z naměřených hodnot grafy.



Obrázek 5.1: Srovnání průběhů zatáčení a naklání křídla

5.2.2 Závěr srovnání vrtulí o různém průměru

Z grafu 5.1 je vidět, že se křídlo při zatáčení naklání, nicméně není patrný rozdíl mezi nakláněním pro různé průměry vrtulí. Nepodařilo se mi tedy ověřit předpoklad, že se křídlo bude výrazněji naklánět s vrtulemi o menším průměru, než o průměru větším.

Kapitola 6

Výsledky

1. Tato práce obsahuje teoretický úvod k systémům distribuovaných pohonů 1.1 a základní aerodynamické vlastnosti křídla 1.3.
2. Navrhnul jsem a sestrojil stojan pro měření náklonu a zatáčení testovacího křídla. Pro hladký pohyb stojanu jsem zvolil ložiska. Zatáčení a náklon křídla měří senzory s Halloovou sondou a jejich analogový výstup zpracovává Arduino Uno. 3.2
3. Připravil jsem model křídla s distribuovaným pohonem. Jako pohon jsem zvolil 8 stejnosměrných elektromotorů, které jsou ovládány pomocí Arduina Uno a k jejich spouštění jsou využity mosfety. Mosfety jsou řízeny pwm výstupy Arduina. 4.2

Motory mají přijatelné rozměry a hmotnost. Proměřil jsem závislost otáček těchto motorů se třemi velikostmi vrtulí na výkonu motoru, a zjistil jsem, že otáčky se neblíží k hodnotě otáček uvedených výrobcem při jmenovitém napětí, ale jsou výrazně nižší. Motory osazené vrtulemi mají tedy nižší otáčky, než bylo zamýšleno a pro další výzkum v oblasti systémů distribuovaných pohonů s tímto křídlem by mohlo být vhodné vyměnit tyto motory za motory s vyššími otáčkami.

4. Pomocí jednoduchého experimentu jsem ověřil, že různá rychlost otáček na polovinách křídla má vliv na naklání křídla. 5.1 Ověřil jsem vliv změny velikosti vrtulí na náklon křídla 5.2. Nastavil jsem pwm výstupy Arduina tak, aby křídlo zatáčelo střídavě na jednu a na druhou stranu o konstantní úhel. Zaznamenával jsem náklon při tomto pohybu a porovnal jej pro tři různé velikosti vrtulí. Výsledky jsem zobrazil grafem. Z výsledků není patrný rozdíl v náklonu křídla pro různé velikosti vrtulí. To může být způsobeno nedostatečnými otáčkami vrtulí, tedy, že rozdíl mezi

zvýšenými a sníženými otáčkami vrtulí nebyl dostatečný na to, aby rozdíl v náklonu křídla projevil v grafu 5.1.

Kapitola 7

Závěr

V rámci práce jsem připravil úvod k systémům distribuovaných pohonů a aerodynamice křídla. Navrhnul jsem stojan, měřící úhel zatočení a náklonu křídla a připravil jsem křídlo s distribuovaným pohonem, které jsem vybavil elektromotory. Napsal jsem program pro Arduino (`mereni_naklonu.ino`) tak, aby nastavovalo výkon motorů, vyčítalo data ze senzorů úhlů a odesílalo data přes sériovou linku. Tyto data jsem uložil do textových souborů pomocí programu, který jsem napsal v Pythonu (`cteni_ze_seriove_linky.py`) a následně zobrazil v grafu 5.1 při porovnání náklonu s různými velikostmi vrtulí.

Ověřil jsem, že dochází k náklonu křídla při zvýšení otáček motorů na jedné polovině křídla. Porovnal jsem vliv tří velikostí vrtulí na náklon křídla. Výsledky z naměřených hodnot neukázaly prokazatelný rozdíl v náklonu křídla, což může být způsobeno několika faktory. Otáčky motorů mohly být příliš nízké, nebo rozdíly v otáčkách na jedné a druhé polovině křídla byly příliš malé na to, aby se více projevil náklon křídla.

Přesto, že měření s různými průměry vrtulí neukázalo zřetelné rozdíly, křídlo se při zatáčení prokazatelně naklání. Tato vlastnost by mohla být předmětem dalšího zkoumání v rámci využití distribuovaných pohonů pro řízení letadla.

Tato práce může sloužit jako podklad k dalšímu výzkumu v oblasti distribuovaných pohonů, který bude moci využít připravenou aparaturu pro tuto práci. Navazující práce by mohla být sestavení letuschopného modelu letadla.



Literatura

- [1] *Pecka-modelář*. <https://www.peckamodel.cz/3bd1005-foxy-250-7-2v-stejnosmerny-motor>. navštíveno: 2023-03-24.
- [2] *Systems analysis and concepts directorate*. <https://sacd.larc.nasa.gov/asab/asab-projects-2/x57maxwell/>. navštíveno: 2023-05-24.
- [3] K. H. DAE, *Distributed propulsion vehicles*. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20100036222>, 2010.
- [4] B. EARL, *Adafruit 16-channel servo driver with arduino*, p. 9. navštíveno: 2023-05-24.
- [5] C. MONROE, *Nasa armstrong fact sheet: Nasa x-57 maxwell*. <https://www.nasa.gov/centers/armstrong/news/FactSheets/FS-109.html>.
- [6] J. REICHL AND M. VŠETIČKA, *Encyklopedie fyziky*. <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/130-zaklady-fyziky-letu>.
- [7] J. SHI, J. ZHOU, AND L. WU, *Aerodynamic investigation of a general aviation aircraft with distributed electric propulsion*. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9574397/>, 2021-8-27.
- [8] D. VECHTEL AND J.-P. BUCH, *Aspects of yaw control design of an aircraft with distributed electric propulsion*, CEAS Aeronautical Journal, 13 (2022), pp. 847–860.
- [9] J. K. VIKEN, S. A. VIKEN, K. A. DEERE, AND M. B. CARTER, *Design of the cruise and flap airfoil for the x-57 maxwell distributed electric propulsion aircraft*. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20180003474>.

- [10] B. WAINFAN, *Wind tunnel*. <https://www.kitplanes.com/wind-tunnel-7/>.
navštíveno: 2023-04-24.



Příloha A

Elektronické přílohy

```
├── Arduino
│   ├── mereni_naklonu.ino
│   └── dalkove_ovladani.ino
└── Python
    └── cteni_ze_seriove_linky.py
```