



**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

F2

**Fakulta strojní
Ústav letadlové techniky**

Bakalářská práce

Návrh modelu větroně kategorie RES

Martin Bartoš

2018

Vedoucí práce: Ing. Jan Klesa, Ph.D.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Bartoš** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **457625**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav letadlové techniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh modelu větroně kategorie RES

Název bakalářské práce anglicky:

Pokyny pro vypracování:

Pro vypracování proveďte:

- 1) Pravidla kategorie RES
- 2) Přehled modelů kategorie RES
- 3) Statistiku modelů
- 4) Výběr profilu křídla
- 5) Návrh geometrie křídla
- 6) Třípohledový nákres

Seznam doporučené literatury:

Dle pokynů vedoucího BP.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jan Klesa, Ph.D., ústav letadlové techniky FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **13.08.2018**

Platnost zadání bakalářské práce:

Ing. Jan Klesa, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Robert Theiner, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
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.

30.4.2018

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování / Prohlášení

Rád bych poděkoval Ing. Janu Klesovi, PhD. za odbornou pomoc a vstřícný postoj při vedení této práce. Dále bych rád poděkoval panu RNDr. Petru Olšákovi za jím vytvořenou šablonu pro sazbu studentských závěrečných prací na ČVUT, kterou pro tuto práci využívám.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím literárních pramenů a informací, které cituji a uvádím v seznamu použité literatury.

V Praze dne 1. 6. 2018

.....

Abstrakt / Abstract

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem rádiem řízeného modelu větroně kategorie RES. V první části práce jsou shrnuta pravidla kategorie, aktuálně používané modely a vybavení potřebné ke správné funkci celého letadla. Následuje kapitola srovnávající různé profily zakončená výběrem nejvhodnějšího pro účel návrhu. Dále je pojednáno o výběru geometrie křídla spolu s návrhem dimenzování nosníku. V závěru práce je vytvořen třípohledový výkres navrženého větroně.

Klíčová slova: model větroně; kategorie RES; aerodynamický návrh.

This bachelor thesis deals with the design of a radio-controlled model of a RES category sailplane. The first part summarises the competition category's rules, existing models and equipment necessary for the plane's proper functioning. A comparison of different profiles is then introduced, followed by choice for the most suitable one for the purpose of this design. Furthermore, choice of geometry for the wing is discussed along with a beam strength calculation. Finally, multiview projection drawing of the sailplane design is presented.

Keywords: sailplane model; RES category; aerodynamic design.

Obsah /

| | |
|---|----|
| 1 Úvod | 1 |
| 2 Pravidla kategorie RES | 2 |
| 2.1 Průběh soutěže | 2 |
| 2.2 Průběh předkol a finálových kol | 2 |
| 2.3 Bodování | 2 |
| 2.4 Požadavky na model letadla | 3 |
| 3 Přehled modelů a používaná elektronika | 4 |
| 3.1 Elektronika | 4 |
| 3.1.1 Přijímač | 4 |
| 3.1.2 Serva | 4 |
| 3.1.3 Akumulátor | 5 |
| 3.2 Modely kategorie RES | 6 |
| 3.2.1 RESolution | 6 |
| 3.2.2 AndREaS | 7 |
| 3.2.3 Picares | 8 |
| 3.2.4 Samba R.E.S EVO | 8 |
| 3.2.5 PURES V2 | 10 |
| 3.2.6 Slite 2M RES | 11 |
| 3.2.7 FRESH | 12 |
| 3.2.8 MADRES | 13 |
| 3.2.9 X-RES | 14 |
| 3.2.10 Baba-Jaga | 16 |
| 3.2.11 RESoholic | 17 |
| 4 Velikost ocasních ploch | 19 |
| 4.1 Mohutnost | 19 |
| 4.1.1 Střední aerodynamická tětíva křídla | 20 |
| 4.1.2 Mohutnost a štíhlost výškového kormidla | 20 |
| 4.1.3 Mohutnost směrového kormidla | 22 |
| 4.2 Porovnání parametrů ocasních ploch | 23 |
| 5 Statistika modelů | 24 |
| 6 Výběr profilu křídla | 26 |
| 6.1 Profily a provozní podmínky .. | 26 |
| 6.2 Model pro rychlostní poláry ... | 27 |
| 6.2.1 Trup a jeho odpor | 28 |
| 6.2.2 Křídlo | 29 |
| 6.2.3 Ocasní plochy | 29 |
| 6.3 Rychlostní poláry | 29 |
| 6.3.1 Minimální opadání a maximální klouzavost | 29 |
| 6.3.2 Porovnání vlastností profilů | 30 |
| 6.3.3 Model zatížený balastem | 30 |
| 6.4 Profily AG27 a BC30 | 32 |
| 7 Návrh geometrie křídla | 34 |
| 7.1 Parametrizace rozměrů | 34 |
| 7.2 Výsledky parametrizace | 35 |
| 7.3 Výsledná geometrie křídla | 36 |
| 7.3.1 Počátek odtržení proudu na křídle | 37 |
| 7.3.2 Parametry zvoleného křídla | 38 |
| 8 Návrh dimenzování nosníku křídla | 40 |
| 8.1 Letová obálka | 40 |
| 8.1.1 Stanovení rychlostí pro kladné násobky | 40 |
| 8.1.2 Stanovení rychlostí pro záporné násobky | 41 |
| 8.1.3 Výsledná obálka | 41 |
| 8.2 Návrh nosníku | 41 |
| 8.2.1 Obdélníková část křídla . | 42 |
| 8.2.2 Koncové části křídla | 43 |
| 9 Třípohledový náčrt a parametry modelu | 44 |
| 10 Závěr | 46 |
| Literatura | 47 |
| A Porovnávané profily | 49 |
| B Souřadnice profilu BC30 | 51 |

Tabulky / Obrázky

| | |
|--|---|
| <p>3.1. Parametry serv5</p> <p>3.2. Parametry akumulátorů5</p> <p>3.3. Specifikace modelu RESolution ..6</p> <p>3.4. Specifikace modelu AndREaS ...7</p> <p>3.5. Specifikace modelu Picares8</p> <p>3.6. Specifikace modelu Samba R.E.S EVO9</p> <p>3.7. Specifikace modelu PURES V2..... 11</p> <p>3.8. Specifikace modelu Slite 11</p> <p>3.9. Specifikace modelu FRESH 12</p> <p>3.10. Specifikace modelu MadRES .. 14</p> <p>3.11. Specifikace modelu X-RES 15</p> <p>3.12. Specifikace modelu Baba- Jaga..... 16</p> <p>3.13. Specifikace modelu Baba- Jaga Competition 17</p> <p>3.14. Specifikace modelu RESoholic . 18</p> <p>4.1. Vlastnosti ocasních ploch modelů letadel..... 23</p> <p>5.1. Porovnání RES modelů 24</p> <p>5.2. Porovnání parametrů křídel jednotlivých RES modelů..... 25</p> <p>6.1. Omočené plochy trupu..... 28</p> <p>6.2. Vlastnosti profilů – 450 g 30</p> <p>6.3. Vlastnosti profilů - 650 g 31</p> <p>6.4. Specifikace profilu BC30 33</p> <p>7.1. Klouzavost a minimální opa- dání parametrizovaných kří- del 35</p> <p>7.2. Vlastnosti vybraných geome- trií 36</p> <p>7.3. Parametry křídla navrženého modelu 39</p> <p>9.1. Specifikace navrženého mo- delu 44</p> | <p>3.1. Model RESolution6</p> <p>3.2. AndREaS7</p> <p>3.3. Picares8</p> <p>3.4. Plán Samba RES 2.....9</p> <p>3.5. Výkres PURES V2 10</p> <p>3.6. Slite 2M RES..... 12</p> <p>3.7. Návrh modelu FRESH 13</p> <p>3.8. Profil modelu MADRES 13</p> <p>3.9. MADRES..... 14</p> <p>3.10. X-RES 15</p> <p>3.11. Baba-Jaga 16</p> <p>3.12. Baba-Jaga Competition..... 17</p> <p>3.13. RESoholic 18</p> <p>4.1. Výpočet mohutnosti..... 19</p> <p>4.2. Polovina křídla modelu FRE- SH 20</p> <p>4.3. Polovina výškového kormidla modelu FRESH 20</p> <p>4.4. Vzdálenost $\frac{1}{4} b_{SAT}$ a $\frac{1}{4} b_{SATVOP}$ modelu FRESH.... 21</p> <p>4.5. Nákres směrového kormidla modelu FRESH 22</p> <p>6.1. Paretův graf při hmotnosti letadla 450 g. 31</p> <p>6.2. Paretův graf při hmotnosti letadla 650 g. 32</p> <p>6.3. Profily AG27 a BC30 32</p> <p>7.1. Parametrizace křídla 34</p> <p>7.2. Součinitel vztlaku v závislosti na rozpětí..... 36</p> <p>7.3. Křídlo výsledné geometrie 37</p> <p>7.4. Výsledná geometrie – rozlo- žení součinitele vztlaku 37</p> <p>7.5. Rychlostní poláry modelu se zvoleným křídlem 38</p> <p>7.6. Poláry modelu se zvoleným křídlem 39</p> <p>8.1. Obratová obálka..... 41</p> <p>8.2. Rozložení ohybového mo- mentu 42</p> <p>8.3. Nákres koncových žeber a umístění nosníku 43</p> <p>9.1. 3D model navrženého větroně . 44</p> <p>9.2. Třípohledový nákres navrže- ného větroně..... 45</p> |
|--|---|

Seznam použitých symbolů a značení

| | |
|-----------------|---|
| A | Mohutnost ocasní plochy |
| A_{SOP} | Mohutnost směrového kormidla |
| A_{VOP} | Mohutnost výškového kormidla |
| b | Délka tětiny profilu křídla |
| b_{max} | Maximální délka tětiny profilu křídla |
| b_{min} | Minimální délka tětiny profilu křídla |
| b_{SAT} | Délka střední aerodynamické tětiny křídla |
| b_{SATVOP} | Délka střední aerodynamické tětiny výškového kormidla |
| $b_{SAT SOP}$ | Délka střední aerodynamické tětiny směrového kormidla |
| b_{SOP} | Délka tětiny profilu směrového kormidla |
| b_{VOP} | Délka tětiny profilu výškového kormidla |
| c | Délka tětiny profilu obdélníkové části křídla |
| $C_{Dcelytrup}$ | Součinitel odporu trupu vztažený na největší průřez trupu |
| C_{Dmin} | Nejmenší možný dosažitelný součinitel odporu větroně |
| $C_{Dpovrch}$ | Součinitel odporu vztažený na povrch trupu |
| C_{DP} | Součinitel odporu nedokonalostí trupu vztažený na největší průřez trupu |
| C_{Dtr} | Výsledný součinitel odporu trupu vztažený na plochu křídla |
| C_{Dtreni} | Součinitel odporu vztažený na největší průřez trupu |
| C_{Dtrup} | Součinitel odporu dokonalého trupu vztažený na největší průřez trupu |
| C_{Dtvar} | Tvarový součinitel odporu trupu vztažený na největší průřez trupu |
| C_L | Součinitel vztlaku křídla |
| C_{Lkrmax} | Maximální součinitel vztlaku křídla |
| C_{Lkrmin} | Minimální součinitel vztlaku křídla |
| C_{Lmax} | Maximální součinitel vztlaku profilu |
| C_{Lmin} | Minimální součinitel vztlaku profilu |
| d | Vnitřní průměr |
| D | Vnější průměr |
| e | Vzdálenost největšího průřezu trupu od špičky trupu |
| F_G | Tíhová síla |
| F_L | Vztlaková síla |
| g | Tíhové zrychlení |
| h | Délka tětiny profilu koncového žebra první lichoběžníkové části křídla |
| j | Délka tětiny profilu koncového žebra druhé lichoběžníkové části křídla |
| k | Koeficient bezpečnosti |
| K_{L0} | Poměr maximálního součinitele vztlaku profilu C_{Lmax} a součinitele vztlaku křídla C_L uprostřed křídla |
| K_{L760} | Poměr C_{Lmax}/C_L ve vzdálenosti $z = 760 \text{ mm}$ |

| | |
|---------------|---|
| $K_{L760neg}$ | Poměr C_{Lmax}/C_L ve vzdálenosti $z = 760 \text{ mm}$ pro křídlo s negativem |
| l | Délka |
| l_{SOP} | Vzdálenost mezi $\frac{1}{4}$ střední aerodynamické tětivy křídla a $\frac{1}{4}$ střední aerodynamické tětivy směrového kormidla |
| l_{VOP} | Vzdálenost mezi $\frac{1}{4}$ střední aerodynamické tětivy křídla a $\frac{1}{4}$ střední aerodynamické tětivy výškového kormidla |
| L | Rozpětí křídla |
| L_{trup} | Délka trupu |
| L_{VOP} | Rozpětí výškového kormidla |
| m | Hmotnost |
| M_o | Ohybový moment |
| M_{omax} | Maximální ohybový moment na křídle |
| n | Provozní násobek |
| Re | Reynoldsovo číslo |
| Re_{max} | Maximální Reynoldsovo číslo |
| Re_{min} | Minimální Reynoldsovo číslo |
| Re_{trup} | Reynoldsovo číslo trupu |
| S | Promítnutá plocha křídla |
| $S_{bocnice}$ | Omočená plocha boční části trupu |
| S_{Dtr} | Největší průřez trupu |
| S_{horni} | Omočená plocha horní části trupu |
| S_{otr} | Omočená plocha celého trupu |
| S_{SOP} | Plocha směrového kormidla |
| S_{trubka} | Omočená plocha trubky v zadní části trupu |
| S_{VOP} | Plocha výškového kormidla |
| t | Teplota |
| v | Rychlost letu |
| v_A | Návrhová rychlost obratu |
| v_D | Maximální návrhová rychlost |
| v_G | Návrhová rychlost obratu při záporném násobku |
| v_{max} | Maximální rychlost letu |
| v_{min} | Minimální rychlost letu |
| v_{S1} | Pádová rychlost při maximální hmotnosti letadla |
| v'_{S1} | Pádová rychlost na zádech při maximální hmotnosti letadla |
| v_x | Horizontální rychlost letu |
| v_y | Vertikální rychlost letu |
| v_{y_min} | Minimální opadání |
| W_o | Průřezový modul v ohybu |
| X | Délka obdélníkové části jedné poloviny křídla |
| Y | Délka první lichoběžníkové části jedné poloviny křídla |

| | |
|-----------------|---|
| z | Souřadnice rozpětí |
| α | Úhel náběhu |
| λ | Štíhlost křídla |
| λ_{VOP} | Štíhlost výškového kormidla |
| ν | Dynamická viskozita |
| ρ | Hustota vzduchu |
| σ_D | Dovolené napětí |
| σ_M | Mez pevnosti |
| σ_o | Napětí v ohybu |
| C_L/C_D | Podíl součinitele vztlaku ku součiniteli odporu |
| $\frac{W}{S}$ | Plošné zatížení při maximální hmotnosti letadla |

Kapitola 1

Úvod

Předmětem této práce je návrh modelu větroně kategorie RES. Jedná se o rádiem řízené letadlo klasické dřevěné konstrukce s maximálním rozpětím křídel 2 metry.

V práci je pojednáno o současných letadlech, které se v kategorii vyskytují. Následně jsou vyhodnoceny některé jejich parametry, na základě kterých je navržen nový model.

Soutěžní kategorie RES je velmi populární v zahraničí, zejména v Německu. Příznivce si získala jednoduchostí stavby a nízkými náklady na výrobu modelu. Není potřeba investovat velké množství peněz, aby byl model vůbec konkurenceschopný. Což se bohužel nedá říct o většině ostatních leteckých modelářských soutěžních kategoriích.

V České republice se soutěž zatím nelétá. Z modelářských fór je ale jasné, že tady kategorie tohoto typu chybí. Uvidíme, zda v následujících letech prorazí i do Čech, ať už se stejným zněním pravidel jako v Německu, nebo s jistými změnami.

Kapitola 2

Pravidla kategorie RES

Kategorie F3RES (dříve F3B-RES) je soutěžní třída rádiem řízených modelů větroňů s maximálním rozpětím křídel 2 metry a převažující dřevěnou konstrukcí. Od ovládacích funkcí je odvozen název celé kategorie. Rudder, Elevator, Spoiler – Směrovka, Výškovka, Spoiler. Model je do vzduchu vypouštěn pomocí gumicuku. Kategorie si klade za cíl nízké náklady na stavbu modelu, uplatnění konstrukčních a stavebních schopností a v neposlední řadě přilákání nových zejména mladých zájemců o soutěžní létání. V soutěži se hodnotí časová délka letu a přesnost přistání. [1]

2.1 Průběh soutěže

Každá soutěž se skládá z alespoň 4 předkol (kvalifikačních kol). Každé kolo jsou účastníci rozděleni do více skupin. Výsledky jsou bodově normalizovány, aby se snížil faktor změny počasí mezi skupinami na celkový výsledek. Z těchto předkol se vyberou zpravidla 4 (maximálně 8) soutěžící s nejvíce body do finálové skupiny. Ta následně odlétá 2 finálová kola tzv. „Fly-Off“, čímž se určí konečné pořadí. Finálová kola mají stejný počet soutěžících jako tomu bylo v předkolech. [1]

2.2 Průběh předkol a finálových kol

Model je do vzduchu vytahován pomocí gumicuku, který zajišťuje a vybírá pořadatel. Gumicuk se musí skládat z gumy délky $15 \pm 0,2$ m a nylonového vlasce o délce 100 ± 1 m a minimálním průměru 0,7 mm. Při natažení gumy na 45 metrů se velikost síly musí pohybovat v rozmezí 2,75–4 kg. Odlišnost mezi jednotlivými gumicuky může být maximálně 0,4 kg. V případě malé plochy letiště nebo kvůli zkrácení letových časů může organizátor nařídit zkrácení nylonového vlasce. [1]

Po vystoupení do požadované výšky se model odpoutá a začíná měřený soutěžní let, ve kterém se pilot snaží udržet ve vzduchu co nejdéle, zejména pomocí termických stoupavých proudů. Měření času končí po zastavení modelu na zemi, nebo po uplynutí pracovního okna vyhrazeného pro dané kolo. Maximální doba letu je 360 s v rámci 9 minutového pracovního okna na jedno kolo. Pokud pilot překročí maximální letový čas 360 s, je mu překročený čas odečten od 360 s. Přistane-li například po 373 s letu, bude mu započítáno 347 s ($360 - 13 = 347$ s). [1]

Soutěžní let je zakončený hodnoceným přistáním na bod, který je každému soutěžícímu přiřazen před letem. Není povoleno přistání „oštěpem“, tzn. zapíchnutí modelu pod úhlem do země tak, že konec trupu zůstane nad zemí. [1]

2.3 Bodování

Letový čas v rámci jednoho kola je bez zaokrouhlení zapsán v celých sekundách. Za každou vteřinu letu získá soutěžící 2 body. Následně se vyhodnotí body za přistání. Po zastavení modelu na zemi se změří vzdálenost od špičky trupu letadla k přistávacímu

bodů. Pokud je tato vzdálenost menší než 0,2 m získává soutěžící plný počet bodů tj. 100. Bodové ohodnocení se postupně snižuje až do 15 metrů od stanoveného místa přistání. Pokud je vzdálenost větší než 15 metrů, nezískává pilot za přistání žádný bod. [1]

Maximální počet bodů, který lze za jeden soutěžní let získat je 820. Tedy 720 bodů za přesně využitý maximální čas (360 sekund) a 100 bodů za přistání do 0,2 m od stanoveného místa.

Po dolétnutí každé skupiny soutěžících se výsledky vyhodnotí. Pilotovi s největším počtem bodů se za výhru ve skupině přiřadí 1 000 bodů. Dalším soutěžícím ze stejné skupiny se body přepočítají poměrným systémem vůči výherci. [1]

2.4 Požadavky na model letadla

Model se obvykle skládá z křídel, trupu a ocasních ploch. Soutěže se mohou účastnit také modely bez trupu či ocasní části, avšak mohou mít ovládané pouze 2 řídicí plochy a každá může být řízena pouze jedním servem. Pravidla tak dávají možnost zúčastnit se i s modelem samokřídla. [1]

Maximální povolené rozpětí křídel je 2 000 mm. Délka letadla, plocha, minimální ani maximální hmotnost nejsou omezeny.

Model s převládající dřevěnou konstrukcí znamená, že kompozitové díly mohou být použity pouze na:

- zadní část trupu maximálně do půlky hloubky křídla, a to ve formě kulaté nebo profilované trubky
- nosník či spojky ve formě kulaté nebo profilované trubky
- náběžnou hranu ve formě tyče, trubky (nemůže být použito kompozitových D-boxů ani celých křídel)
- táhla a závěsy ocasních ploch

Všude jinde musí být použito výhradně dřevo a balsa. Povrch modelu může být potažen nažehlovací fólií, hedvábím, papírem či polyesterovými materiály. Rádus špičky trupu nesmí být menší než 5 mm. Nejsou povoleny žádné sklopné či pevné vyčnívající předměty na spodní straně trupu, které by napomáhaly brzdění modelu na zemi. Zespodu může být umístěn pouze vlečný háček, který může být nastavitelný, avšak nikoli pilotem za letu. Pouze mechanicky na zemi. [1]

V letadle je možné mít balastní zátěž z důvodu lepší pronikavosti proti větru. Zátěž se musí nacházet uvnitř modelu a musí být bezpečně zajištěna. [1]

Spoilerů může být na letadle více a mohou být ovládané jedním nebo dvěma servy. Spoiler se musí nacházet na vrchní straně křídla alespoň 5 cm před odtokovou hranou křídla. [1]

Je zakázána telemetrie, tedy přenos informací z modelu k pilotovi. Možné je přenášet pouze sílu signálu, napájecí napětí přijímačových baterií a teplotu přijímače. Je zakázáno používání variometru. [1]

Soutěžící může použít během soutěže maximálně dva modely. V jednom kole může být vyměněn jeden model za druhý pouze, pokud první přistane v okruhu do 15 metrů od stanoveného přistávacího bodu. [1]

Kapitola 3

Přehled modelů a používaná elektronika

3.1 Elektronika

Převedení našeho povelu až ke konkrétní ovládací ploše vyžaduje několik elektronických prvků, jak v letadle, tak na zemi. V první řadě musíme uskutečnit povel a ten pomocí vysílače vyslat směrem k modelu. Tam je signál zachycen **přijímačem**, zpracován a předán na daný výstup, na který byl povel adresován. Do výstupů přijímače jsou zapojena jednotlivá **serva**. To jsou zařízení, která v sobě mají malý elektromotor, řídicí elektroniku a převody. Na výstupu ze serva je páka, která koná rotační pohyb a je spojena přímo (mechanicky) s ovládací plochou. Celý tento systém musí být napájen z **akumulátoru**, který se připojuje do přijímače.

V kategorii RES je kladen důraz zejména na nízkou hmotnost. Zvolením optimální velikosti elektronických zařízení a jejich vhodného umístění v modelu lze hodně hmotnosti ušetřit jak na samotných prvcích, tak třeba v potřebě minimálního dovážení modelu do špičky trupu pro správnou polohu těžiště.

3.1.1 Přijímač

Volba přijímače se primárně odvíjí od námi používané RC soupravy (vysílače). Přijímač musí mít alespoň 3 kanály – servo VOP, servo SOP a servo pro spoiler. Pokud model vyžaduje dvě serva na spoiler potřebujeme alespoň 4 kanálový přijímač, popřípadě máme možnost připojit dvě serva pomocí Y-kabelu, který rozešle stejný signál do dvou serv, a tím pádem je využit pouze jeden kanál na přijímači.

V dnešní době není s počtem kanálů žádný problém. Soupravy pro modely letadel jsou prakticky vždy minimálně 4 kanálové, nejběžněji 6–9 kanálové. Nejvyšší řady souprav mohou ovládat i 18 kanálů.

Hmotnost přijímače se odvíjí právě od počtu kanálů. Nejlehčí modely jednotlivých firem se pohybují okolo 4–6 g.

3.1.2 Serva

Nabízená škála serv vhodných pro kategorii RES je obrovská. Důležitá je především dostatečná síla a malé rozměry, aby se serva vešla do úzkého trupu, popřípadě křídla. V neposlední řadě je přijatelná hmotnost, rozmezí napájecího napětí a rychlost serv. Literatura doporučuje taková serva pro ocasní plochy, která by měla kroutící moment od 10 do 20 N.cm a hmotnost okolo 10 g. Serva pro spoiler mohou být menší. Moment okolo 10 N.cm a hmotnost nejčastěji 5 g. [2]

Níže v tabulce 3.1 jsou uvedena doporučená a běžně používaná serva pro kategorii RES i s jejich parametry. První tři serva, seřazená vzestupně podle ceny, jsou menší a jsou vhodná spíše pro spoiler. Poslední 4 serva, též seřazená vzestupně podle ceny, jsou určena primárně pro ocasní plochy, ale dají se použít i na spoiler. Hodnoty rychlostí a momentů jsou uvedeny pro napětí 4,8 V, pokud není uvedeno jinak. Serva mají plastové převody až na model KST DS113MG, který je má kovové. Výhoda je ve větší

| Název | Rozměry(ŠxVxD) [mm] | Hmotnost [g] | Moment [N.cm] | Rychlost [s/60°] | Napětí [V] |
|---------------|------------------------|-----------------|------------------|---------------------|---------------|
| EMax ES9051 | 8,3 x 23,2 x 19,7 | 4,1 | 8 | 0,09 | 4–5,5 |
| DYMOND D47 | 8 x 17,7 x 22 | 4,7 | 11 | 0,18 | 3,6–7,4 |
| HS-40 | 8,6 x 17 x 20 | 4,8 | 6 | 0,12 | 4,8 |
| EMax ES08A II | 11,5 x 24 x 23 | 8,5 | 15 | 0,12 s/45° | 4,8–6 |
| KST DS113MG | 11,7 x 27,7 x 23,9 | 12 | 18 | 0,11 | 4,8–6 |
| DYMOND D60 | 9,2 x 24 x 27 | 9 | 20 | 0,15 | 3,6–7,4 |
| KST X08 | 8,0 x 16,8 x 23,5 | 8,4 | 22 (6 V) | 0,15 (6 V) | 3,8–8,4 |

Tabulka 3.1. Parametry serv.

odolnosti serva vůči nárazům do ojavných ploch (například při přistání). To se však nepříjemně promítá do vyšší hmotnosti serva.

3.1.3 Akumulátor

Možností, jakým způsobem napájet elektroniku v modelu, je více. Odvíjí se od napětí, při kterém jsou schopná pracovat serva a od napětí, které dovoluje přijímač.

| Název | Jmenovité napětí [V] | Hmotnost [g] |
|--|----------------------|--------------|
| NiMH ENELOOP 4,8 V, 800 mAh | 4,8 | 51 |
| NiMH ENELOOP Lite 4,8 V, 550 mAh | 4,8 | 44 |
| NiMH Shark Rx akupack 4,8 V, 350 mAh | 4,8 | 32 |
| 2S LiPo XPower ECO 800 mAh, 25C | 7,4 | 43 |
| 2S LiPo XPower ECO 400 mAh, 30C | 7,4 | 31 |
| 1S LiPo Turnigy nano-tech 750 mAh, 35C | 3,7 | 20 |

Tabulka 3.2. Parametry akumulátorů.

1. NiMH akumulátor

Nejrozšířenější možností jsou 4 nabíjecí akumulátory NiMH, každý s jmenovitým napětím 1,2 V, zapojeny do série. Celkově tedy poskytují napětí 4,8 V, které je standardně používané a neomezuje nás ve výběru serv. Jedná se však o možnost s největší hmotností. V kategorii RES se využívají prakticky dva typy NiMH akupacku. V prvním případě je složen ze čtyř článků NiMH ENELOOP 1,2 V, 800 mAh, v druhém případě pak z NiMH ENELOOP 1,2 V 550 mAh. Ve velikosti se od sebe akupacky neliší, pouze v hmotnosti je malý rozdíl. Hmotnost 800 mAh akupacku je přesně 50 g, 550 mAh akupack váží 44 gramů.

2. LiPo akumulátor + BEC stabilizátor

Další možností je použití akumulátorů technologie LiPo. Jedná se o články v modelářině dominantně využívané, zejména díky dobré hustotě elektrické energie na jednotku hmotnosti a vysoké proudové zatížitelnosti. Zapojením dvou LiPo článků do série získáme jmenovité napětí 7,2 V. Následně je baterie připojena do zařízení BEC, které napětí sníží na námi nastavené napětí většinou v rozmezí 5–6 V. Hmotnost takového BEC stabilizátoru se pohybuje od 5–10 g.

3. LiPo akumulátor

Pokud použijeme serva a přijímač, které dovolují napájení 2S LiPo (7,4 V jmenovité, 8,4 V maximálně), můžeme akumulátor zapojit přímo do přijímače a nepotřebujeme žádný mezičlen, který by nám měnil napětí. Tato aplikace zmenšuje škálu

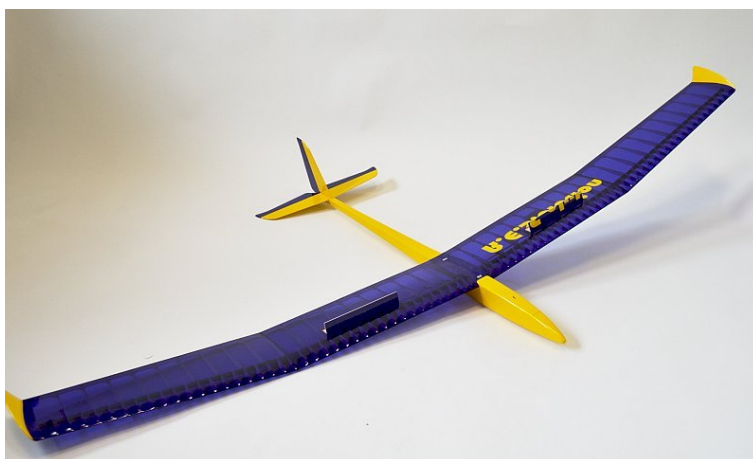
použitelných serv a přijímačů a nelze pořídit serva v té nejnižší cenové kategorii, protože ta nejsou na toto napětí konstruována.

Někteří modeláři používají napájení pouze pomocí 1S LiPo (3,7 V jmenovitě, 4,2 V maximálně). Serv, která jsou schopná při takovém napětí pracovat, není, podobně jako tomu je u napájení 2S, mnoho. Například serva DYMOND takto nízké napětí zvládají, avšak výkonnostně na tom budou při nižším napětí hůř, než je uvedeno v tabulce 3.1.

3.2 Modely kategorie RES

3.2.1 RESolution

Jedná se o model s celodřevěným trupem, s výškovkou a směrovkou klasického uspořádání. Na hlavní nosník křídla je použita uhlíková trubka. Letadlo nepatří mezi nejlehčí modely této kategorie. Na vině větší hmotnosti jsou 2 serva potřebná pro spoilery na křídle, celodřevěný trup a právě i klasické uspořádání výškovky a směrovky. Díky vyšší hmotnosti (okolo 600 g), a zároveň i zvolenému profilu S7012 se model dokáže prosadit i v silnějším větru. Křídlo má dvojitě vzepětí a skládá se ze dvou částí, které jsou spojeny uhlíkovou tyčkou. Celé křídlo je pak přišroubováno 4 plastovými šrouby k trupu. [3]



Obrázek 3.1. Model RESolution. [4]

| | |
|---------------------------------------|------------|
| Délka [mm] | 1 120 |
| Rozpětí [mm] | 1 980 |
| Profil | S7012 |
| Výška profilu – u kořene [mm] | 17,5 (8 %) |
| Hloubka křídla – u kořene [mm] | 187 |
| Štíhlost křídla [-] | 11,3 |
| Plocha křídla [dm ²] | 34,8 |
| Hmotnost [g] | 590 |
| Plošné zatížení [g.dm ⁻²] | 17 |

Tabulka 3.3. Specifikace modelu RESolution.[2]

3.2.2 AndREaS

Model AndREaS lze vidět velmi často na fotografiích a videích z jednotlivých soutěží kategorie RES v Německu. Jedná se prakticky o nástupce modelu RESolution. Na základě zkušeností vyvinul Pietro Tescari z firmy Holzmodellen nový model. Andreas Decker (nejlepší přítel Pietra Tescariho) vyhrál kvalifikační lety a celkově skončil 4. na první zastávce německého seriálu v březnu 2015. Krátce na to Andreas Decker zemřel. Model byl na jeho počest pojmenován právě AndREaS.



Obrázek 3.2. Model AndREaS. [5]

V mnoha ohledech je konstrukčně podobný svému předchůdci. Jedná se o celodřevěnou konstrukci bez použití jediného vlákna uhlíku. Ocasní plochy jsou klasického uspořádání, avšak oproti modelu RESolution má AndREaS výškové kormidlo před směrovým. Obě plochy jsou postaveny konstrukčně z jednotlivých špalíčků balsy, které do sebe pomocí zámků zapadají.

| | |
|---------------------------------------|------------|
| Délka [mm] | 1 150 |
| Rozpětí [mm] | 1 990 |
| Profil | MB-674RES |
| Výška profilu [%] | 8,5 |
| Hloubka křídla – u kořene [mm] | neudává se |
| Štíhlost křídla [-] | 11,7 |
| Plocha křídla [dm ²] | 33,8 |
| Hmotnost [g] | od 490 |
| Plošné zatížení [g.dm ⁻²] | od 14,5 |

Tabulka 3.4. Specifikace modelu AndREaS.[6][7]

Oproti konkurentům se části křídel nespojují k sobě. Naopak se každá polovina zasune na 5 mm spojky křídla, které jdou skrz trup. Křídlo má vzepětí již od trupu a druhé lomení se nachází v půlce každé části křídla. Vnitřní část je obdélníková, vnější už postupně ubíhá do menší hloubky křídla. Na úplném konci se nacházejí menší winglety. Model využívá dvou spoilerů umístěných blíž k náběžné hraně než k odtokové.

Hlavní nosník je tvořen balsovou stojinou odlehčenou tvarovými výřezy a dvěma smrkovými lištami. Žebra jsou balsová, pouze u trupu jsou 3 kusy z překližky. U spojení uší je jedno překližkové žebro vždy na každé části. Celá náběžná hrana je doplněna balsovým D-boxem.

3.2.3 Picares

Model Picares je kompletně celodřevěné konstrukce. Výrobce nabízí obě možnosti ocasních ploch, jak klasické uspořádání, tak i motýlkové ocasní plochy. U klasického uspořádání je výškové kormidlo i směrové kormidlo z jednoho kusu balsy, odlehčeného vyfrézovanými otvory. Plochy se musí zaoblit a potáhnout. Brzdící klapka je umístěna na středu křídla, který je rovný. Konce křídla jsou nadvakrát lomené. Křídlo je rozbitelné na tři části. Spojení částí zajišťuje dřevěný nosník, který je pevně spojený s uchem a který se zasune do komory ve středu křídla. K udržení ucha ve správné poloze jsou využity magnety.



Obrázek 3.3. Model Picares. [8]

| | |
|---------------------------------------|------------|
| Délka [mm] | 987 |
| Rozpětí [mm] | 1 950 |
| Profil | AG Strak |
| Výška profilu – u kořene [mm] | 16,6 (9 %) |
| Hloubka křídla – u kořene [mm] | 175 |
| Štíhlost křídla [-] | 12,6 |
| Plocha křídla [dm ²] | 30,1 |
| Hmotnost [g] | 537 |
| Plošné zatížení [g.dm ⁻²] | 17,8 |

Tabulka 3.5. Specifikace modelu Picares.[2]

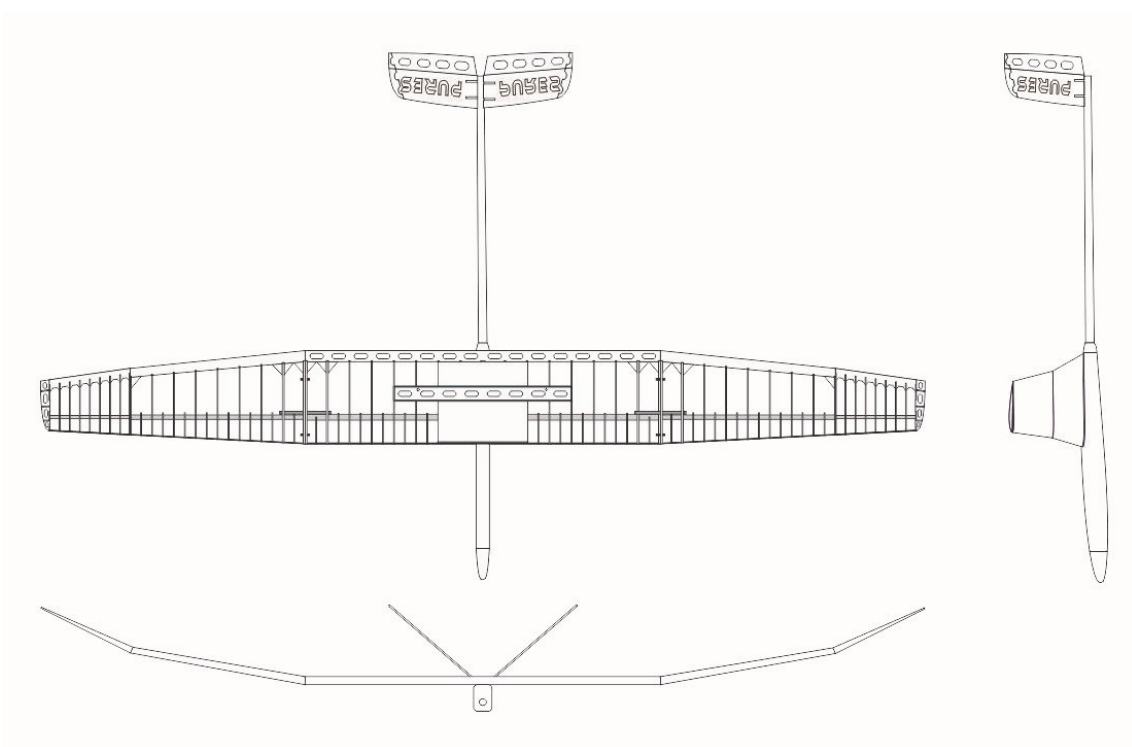
3.2.4 Samba R.E.S EVO

Model Samba má dřevěné křídlo, dřevěnou gondolu trupu a dřevěné ocasní plochy klasického uspořádání. Uhlíková trubka o průměru 10 mm je použita pouze na zadní

3.2.5 PURES V2

Model PURES poprvé vzlétl na soutěži v Dachau v září 2012. Poté konstruktér Josef Gergetz provedl další změny v geometrii křídla, ocasu a snížení hmotnosti, čímž se zrodil PURES V2. Tento model se stal celkovým vítězem série závodů Bavaria Open 2013. V roce 2014 se tento model umístil na 1. a 3. místě Německého mistrovství v Hirzenhainu a titul obhájil i v roce 2015 na Německém mistrovství ve Wetzlaru. Stal se na německých soutěžích velmi populární. [10] [11]

Model PURES V2 je oproti první verzi osazen kónickou uhlíkovou trubkou v zadní části trupu, na které jsou pomocí 4 ocelových tyček o průměru 2 mm umístěné dvě deskové ocasní plochy do V ze 4 mm balsy bez profilu. Kvůli dalšímu snížení hmotnosti byly později ocelové tyčky nahrazeny uhlíkovými a deskové ocasní plochy nahrazeny profilovanými konstrukčními. Zde je použita lehká balsa na žebra, uhlíkové tyčky na nosník a náběžnou hranu. Stejná konstrukce je využito i u křídla – uhlíková tyčka náběžné hrany a uhlíková trubka jako hlavní nosník. Na ten jsou jednotlivá žebra a položebra navlečena. Konstruktér použil dva různé průměry trubky. Tlustší na střed křídla, tenčí na uši. Na křídle je jedna brzdící klapka umístěna uprostřed. Celé křídlo je rozebíratelné na 3 části pro lepší přepravu – středová část a 2 uši.



Obrázek 3.5. Výkres prvního prototypu modelu PURES V2 (prosinec 2012). [12]

Křídlo je tvořeno 810 mm dlouhou obdélníkovou středovou částí bez vzepětí s konstantní hloubkou 212 mm. Následuje první lichoběžníková část uší se vzepětím 10° a délkou 400 mm na každé straně. Hloubka se zde lineárně mění z 212 mm až na 150 mm, kde se napojuje další část ucha. Ta je zvednuta o dalších 16° , dlouhá 180 mm a hloubka se mění razantněji než u předchozí části až na konečných 115 mm. Na úplném konci křídla je malá balsa destička tvořící koncový oblouk. Hlavním profilem je AG35, pouze na konci křídla je použit AG36. Spoiler je navržen jeden na střední části křídla a je ovládán jedním servem. Začíná lehce před polovinou hloubky křídla. Délka spoileru je okolo 400 mm, šířka 32 mm a plocha $1,28 \text{ dm}^2$.

Změny u verze 2 oproti první verzi dokázaly snížit hmotnost celého letadla a zajistit větší konkurenceschopnost. Největší novinky jsou:

- ocasní plochy do V (dříve klasicky VOP, SOP zvlášť)
- přepracovaná konstrukce trupu – využití kónické uhlíkové trubky v zadní části
- uhlíková trubka místo dřevěného nosníku křídla
- uhlíková tyčka na náběžné hraně spolu s použitím položeb nahradily balsový D-box

Hmotnost celého modelu se při stavbě podle návodu ze stavebnice a použití standardní potahovací fólie pohybuje mezi 450–500 g. Konstrukčními ocasními plochami, lehkým potahovým materiálem, lehkým vybavením a střídáním používáním lepidla se někteří majitelé dostali až na vzletovou hmotnost 415 g.

| | |
|---------------------------------------|-----------------|
| Délka [mm] | 1 120 |
| Rozpětí [mm] | 1 990 |
| Profil | AG35-AG36 Strak |
| Výška profilu – u kořene [mm] | 19 (8 %) |
| Hloubka křídla – u kořene [mm] | 212 |
| Štíhlost křídla [-] | 11 |
| Plocha křídla [dm ²] | 36,5 |
| Hmotnost [g] | od 420 |
| Plošné zatížení [g.dm ⁻²] | od 12 |

Tabulka 3.7. Specifikace modelu PURES V2.[11][2][12][10]

3.2.6 Slite 2M RES

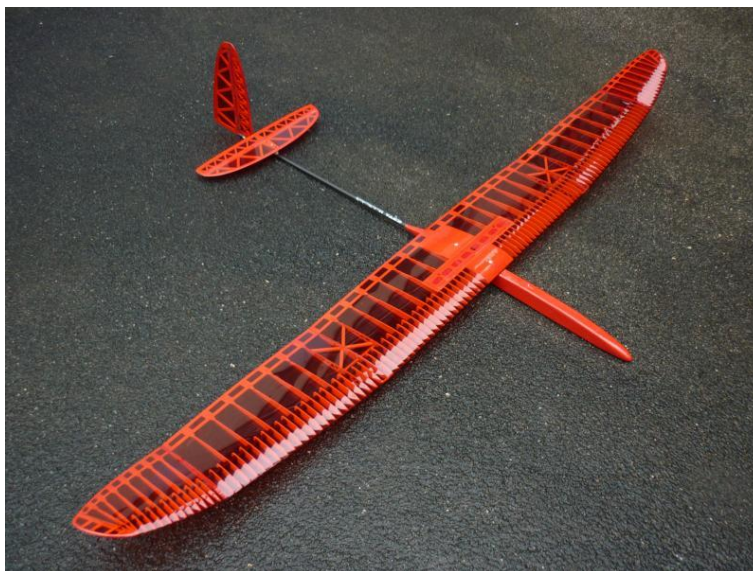
Jedná se o nástupce modelu PURES V2. Konstruktor Josef Gergetz využil vlastnosti předcházejícího modelu a vytvořil Slite 2M. Na první pohled je patrné celkově kulatější křídlo, které není jasně lichoběžníkové, jako u modelu PURES, ale spíše eliptické. Změnu prodělalo i celkové vzepětí. Místo 10° a 16° se snížilo na 8° a 12°. Jiné jsou i použité profily – modifikované AG25 a AG27. Odtoková hrana se zdá být více odlehčená většími otvory. Bylo použito více položeb, při zachování stejného počtu celých žeb. Do mezery mezi dvě sousední celá žebra, ve střední rovné části a v první části uší, jsou vměstnány vždy dvě položebra (PURES měl pouze jedno položebro).

| | |
|--------------------------------------|---------------------|
| Délka [mm] | 1 240 |
| Rozpětí [mm] | 1 960 |
| Profil | AG25–AG27 mod Strak |
| Výška profilu – u kořene [mm] | neudává se |
| Hloubka křídla – u kořene [mm] | neudává se |
| Štíhlost křídla [-] | 10,4 |
| Plocha křídla [dm ²] | cca 37 |
| Hmotnost [g] | od 400/420 |
| Plošné zatížení [g.dm ²] | od 11 |

Tabulka 3.8. Specifikace modelu Slite.[13]

Zákazník má na výběr ze dvou verzí modelu na základě rozdílného řešení ocasních ploch. Výrobce udává, že s ocasními plochami do V lze dostat hmotnost celého letadla až ke 400 g, zatímco s klasickou konstrukcí ocasních ploch (VOP, SOP zvlášť) začíná hmotnost při nejlepším na 420 g. V případě konstrukce do V je použito profilu HT12,

uhlíkové tyčky jako nosníku a náběžné hrany a balsových žeber. Klasická konstrukce je poslepovaná ze špalíčků tlusté balsy a následně zbroušena. Na trupu je výškovka umístěna před směrovkou. Ovládání je realizováno pomocí nitě v bowdenu. Na ocasních plochách je zkrutný drát, který táhne pohyblivou část k jedné straně výchylky a zajišťuje neustálý tah v nitě. Servo tuto sílu překonává a pohybuje s řídicí plochou.



Obrázek 3.6. Slite 2M RES. [14]

3.2.7 FRESH

Tento model konstruoval Němec Oliver Matzen. Model začal vznikat koncem roku 2015 a první lety prototypu se uskutečnily na jaře 2016. Jak sám autor píše na německém fóru RC-Network.de, popudem k vlastní konstrukci pro něho byly dlouhé dodací lhůty modelů PURES V2 a Slite 2M RES.

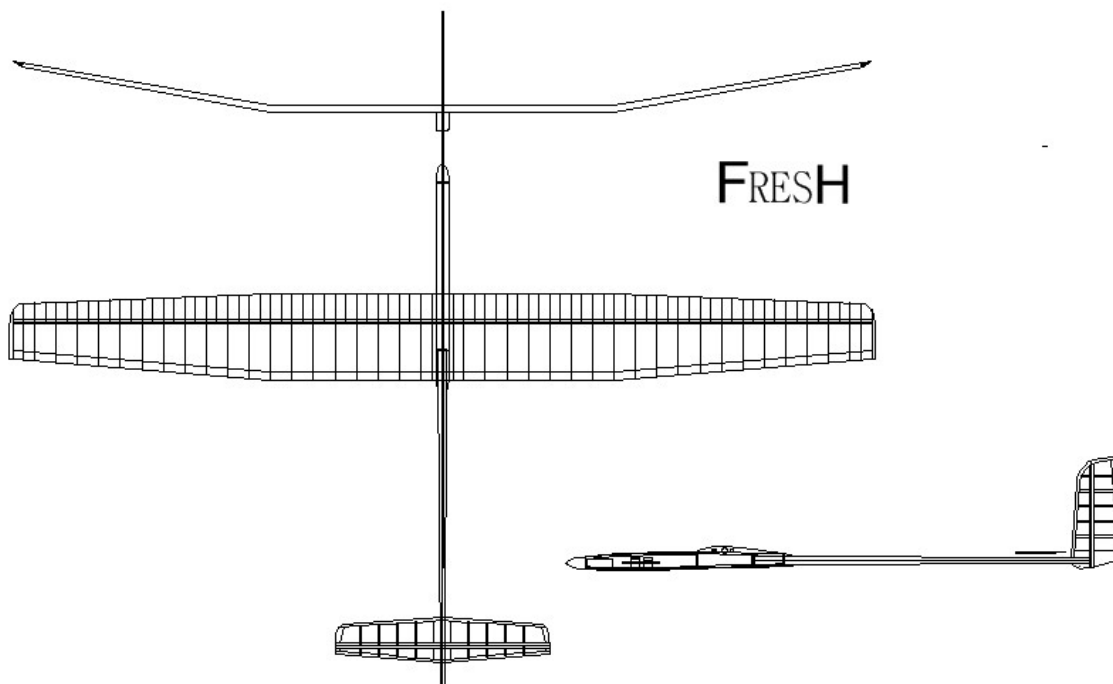
| | |
|---------------------------------------|---------------|
| Délka [mm] | 1 300 |
| Rozpětí [mm] | 2 000 |
| Profil | AG36–AG37 mod |
| Výška profilu – u kořene [mm] | neudává se |
| Hloubka křídla – u kořene [mm] | 200 |
| Štíhlost křídla [-] | 11,2 |
| Plocha křídla [dm ²] | 35,6 |
| Hmotnost [g] | od 435 |
| Plošné zatížení [g.dm ⁻²] | 12,6 |

Tabulka 3.9. Specifikace modelu FRESH.[15][16]

Model FRESH je v konstrukci křídla velmi podobný právě modelu PURES. Jako nosník křídla je na střední části a na 200 mm v uších použita uhlíková trubka 12/11 mm. Na koncích uší jsou použity 8/7 mm uhlíkové trubky. Na ně se navlékají žebra a položebra, které zabráňují častému prohýbání nažehlovací fólie na náběžné hraně mezi sousedními žebry. Střed křídla je rovný, obdélníkový. Jak lze vidět na obrázku 3.7 bylo na prvním prototypu modelu FRESH použito pouze jednoho vzepětí uší s úhlem asi 10°. Následně byl model přepracován a bylo přidáno ještě jedno vzepětí uší blíž konci křídla. Celé křídlo je možné rozložit na 3 části pro lepší transport. Spojení částí zajišťují

uhlíkové tyčky o průměru 4 mm, které jsou zasunuty do hliníkových trubiček 5/4 mm zalepených v uhlíkových nosnících. Správnou pozici zajišťují magnety.

Ocasní plochy jsou klasického uspořádání, výškové kormidlo je před směrovým. Jedná se o balsovou konstrukci bez profilu. Poslepováním částí ze 4 mm balsy vznikne kostra. Náběžná a odtoková hrana jsou zabroušeny do tvaru a celé plochy jsou následně potaženy fólií. Využito je stejně jako u modelu Slite 2M táhel z nití.



Obrázek 3.7. Návrh prvního prototyp modelu FRESH z roku 2015. [16]

3.2.8 MADRES

Model MADRES se od ostatních hojně využívaných modelů liší. Při návrhu byl kladen velký důraz na jednoduchost stavby a nízkou výslednou hmotnost modelu. První prototyp vzlétl na začátku roku 2016 a vážil pouhých 279 g. Model má menší plochu křídla, než jeho konkurenti. Přesto se plošné zatížení pohybuje na podobných hodnotách jako u ostatních modelů.



Obrázek 3.8. Profil modelu MADRES. [17]

Křídlo je ze 3 částí – rovný střed a nadvakrát vzepjaté uši. Všechny části jsou vyrobené z jednoho kusu balsy, vybroušeny do tvaru profilu a se zářezy pro uhlíkové pásnice, které slouží jako výztuhy. Celé křídlo má prakticky rovnou náběžnou hranu. Střed křídla se spoilerem uprostřed je dlouhý 970 mm, uprostřed je největší hloubka 162 mm, na kraji 140 mm. První část ucha je lichoběžníkového tvaru dlouhá 300 mm a na konci má hloubku 100 mm, vzepětí $8,5^\circ$. Koncová část ucha je dlouhá 210 mm se vzepětím 24° od předcházející části ucha. Všechny části jsou slepeny k sobě a potaženy nažehlovací fólií. Křídlo nelze rozkládat. Přidělení k trupu se realizuje pomocí 2 šroubů.



Obrázek 3.9. Modely MADRES. [18]

Model má klasické uspořádání ocasních ploch s výškovkou předřazenou směrovému kormidlu. Na ně navazuje uhlíková trubka skrz kterou vedou řídicí bowdeny.

| | |
|---------------------------------------|----------------|
| Délka [mm] | 1 067 |
| Rozpětí [mm] | 1 992 |
| Profil | GT Synergy mod |
| Výška profilu – u kořene [mm] | 9,2 (5,7 %) |
| Hloubka křídla – u kořene [mm] | 162 |
| Štíhlost křídla [-] | 14,8 |
| Plocha křídla [dm ²] | 26,8 |
| Hmotnost [g] | 310–350 |
| Plošné zatížení [g.dm ⁻²] | 12,1 |

Tabulka 3.10. Specifikace modelu MadRES.[19][20][21]

3.2.9 X-RES

Model navrhl Alois Janowetz a v roce 2016 vzlétly první prototypy. Letadlo navazuje na předchozí model Minores od stejného konstruktéra. Hned po pár soutěžích bylo jasné, že je X-RES velkým konkurentem a že se s ním musí ve startovním poli počítat. Opadání modelu je podle měření $0,31 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ při klidném letu v klidném vzduchu bez stoupavých proudů. [22]

Model je klasické celodřevěné konstrukce. Křídlo se jako u dalších modelů skládá z rovné středové části a nadvakrát lomených uší. Střed křídla je obdélníkový, bez vzepětí. Uši jsou pak lichoběžníkového tvaru. Vzepětí je v první fázi 10° a v druhé 12° . [23]

Hlavní nosník střední části je ze smrkové lišty a v kombinaci s balsovým D-boxem poskytuje křídlu dostatečnou pevnost zejména na krut. Žebra jsou primárně balsová,

pouze na krajích a středu křídla je použito překližkových. Na horní straně se nacházejí 2 spoilery, které jsou umístěny až u uší. V manuálu k modelu je použito 2 serv umístěných v křídle. Každé ovládá jeden spoiler. Na některých fotkách hotových modelů X-RES lze vidět, že někteří modeláři použili řešení jen s jedním servem v trupu a pomocí 2 bowdenů umístěných v křídlech se povel přenáší až k ovládacím plochám.

První část uší je z 6 balsových žeber a 2 žeber z 3 mm překližky. Smrkový nosník je v této části nahrazen balsovým. Druhá část uší má celkem 5 žeber, všechna balsová a nemá již žádný nosník. Obě části pokračují v balsovém D-boxu. [23]



Obrázek 3.10. Model X-RES. [24]

Trup nevyužívá kompozitové trubky, jak je u modelů této kategorie populární. Přesto se hmotnost celého letadla pohybuje na výborných hodnotách okolo 430 g bez zásahu do konstrukce a postupu stavby jak je popsáno v manuálu. Trup je připraven na zabudování balastní šachty. Dle manuálu je doporučeno použít válečky o průměru 10 mm složené z měděné trubky vyplněné olovem. [23]

Jak lze z obrázku 3.10 vidět, ocasní plochy jsou klasického uspořádání. Výškovka se nachází před směrovkou, je plovoucí na malém pohyblivém uhlíkovém pylonu, který umožňuje naklápět celou VOP. Na pylonu je závit a vodorovná ocasní plocha se přidělává pomocí jednoho plastového šroubku M4. Celý trup je po sejmutí výškového kormidla plošší, což zajišťuje lepší skladovatelnost a transport trupu. Obě ocasní plochy jsou stavěny bez profilu z 4 mm balsy a následně zbrušeny do aerodynamicky přijatelnějšího tvaru. [23]

| | |
|---------------------------------------|------------|
| Délka [mm] | 1 220 |
| Rozpětí [mm] | 1 999 |
| Profil | AG mod |
| Výška profilu – u kořene [mm] | neudává se |
| Hloubka křídla – u kořene [mm] | neudává se |
| Štíhlost křídla [-] | 10,5 |
| Plocha křídla [dm ²] | 38 |
| Hmotnost [g] | od 430 |
| Plošné zatížení [g.dm ⁻²] | od 11,3 |

Tabulka 3.11. Specifikace modelu X-RES.[23]

3.2.10 Baba-Jaga

Model Baba-Jaga je výsledkem práce konstruktérů z AKA-model, Stuttgart. Pilot Ruben Bühler vyhrál právě s tímto modelem celý seriál závodů Bavaria Open 2014. Na základě zkušeností se pak Ruben Bühler a Jonas Ilg rozhodli vylepšit již tak velmi dobrý model a vznikla Baba-Jaga Competition. Jedním z hlavních požadavků bylo vylepšení modelu v prosazení proti větru, aby v případě sílícího větru byl schopen doletět co nejdále, za účelem najít další stoupavé proudy. Celkový design byl přepracován v zájmu snížení hmotnosti modelu. Model však může být stále použitelný a konkurenceschopný ve větrných podmínkách díky balastní šachtě, kterou lze rychle naplnit různým typem balastu. [25]



Obrázek 3.11. Model Baba-Jaga. [26]

Zřejmě největší změnou oproti původní verzi modelu je změna profilové řady. Nově je použito profilů BC70, BC50, BC30, oproti dřívějším AG34, AG35 a AG37. Dalšími velkými úpravami je nahrazení zadní části konstrukčního trupu za uhlíkovou trubku. Spolu s odlehčením částí křídla jde o největší úsporu hmotnosti.

| | |
|---------------------------------------|----------------|
| Délka [mm] | 1 102 |
| Rozpětí [mm] | 1 992 |
| Profil | AG34–AG35–AG37 |
| Výška profilu – u kořene [mm] | 17 (8 %) |
| Hloubka křídla – u kořene [mm] | 209 |
| Štíhlost křídla [–] | 11,5 |
| Plocha křídla [dm ²] | 34,7 |
| Hmotnost [g] | 492 |
| Plošné zatížení [g.dm ⁻²] | 14,2 |

Tabulka 3.12. Specifikace Baba-Jaga.[2]

Křídlo je konstrukční, hlavní nosník není z uhlíkové trubky. Je použito kombinace balsy a uhlíkových pásnic. Ty jsou umístěny na horní a spodní straně žebry. Ke zvýšení tuhosti a vyplnění prostoru mezi žebry jsou použity balsové stojiny. Náběžná hrana je pak doplněna balsovým D-boxem. Křídlo je nadvakrát lomené – střed rovný, první část uší je přizvednuta o 7° a druhá o dalších 10°.

Dále je patrné rozdělení jednoho velkého spoileru do dvou menších, nacházejících se na krajích středové části křídla. Jejich ovládání je řešeno pomocí jednoho serva uprostřed



Obrázek 3.12. Model Baba-Jaga Competition. [27]

křídla a uhlíkové trubky. Servo s trubicí otáčí a na jejích koncích jsou excentrické členy, které vyklápějí spoilery.

Do modelu je vhodné vestavět balastní šachtu. To se u tohoto modelu řeší například kompozitovou trubicí ze skelných vláken umístěnou podélně v trupu pod křídlem. Tu pak lze plnit mosaznými válečky a přidat dalších až 200 g k celkové hmotnosti. V případě použití například olova by se hmotnost dala ještě zvýšit, zřejmě to však ze zkušenosti ze soutěží není potřeba.

Konstrukce ocasních ploch zůstala z velké části zachována z původní verze modelu. Jedná se o plovoucí výškové kormidlo umístěné na pylonu a směrové kormidlo umístěné na konci trupu, které je z části umístěné pod uhlíkovou trubicí konce trupu. Konstrukce je prakticky identická s modelem X-RES.

| | |
|---------------------------------------|----------------|
| Délka [mm] | 1 100 |
| Rozpětí [mm] | 2 000 |
| Profil | BC80–BC50–BC30 |
| Výška profilu – u kořene [mm] | 8 % |
| Hloubka křídla – u kořene [mm] | 209 |
| Štíhlost křídla [-] | 11,5 |
| Plocha křídla [dm ²] | 34,7 |
| Hmotnost [g] | 400 |
| Plošné zatížení [g.dm ⁻²] | 11,5 |

Tabulka 3.13. Specifikace modelu Baba-Jaga Competition.[25]

3.2.11 RESoholic

Model RESoholic je produktem rakouské firmy AR Flugmodelle. Letadlo zaujme hned na první pohled dost odlišným tvarem oproti svým konkurentům.

Zejména pak samotné křídlo „ptačího tvaru“, které má z velké části rovnou náběžnou hranu, která až ke konci křídla rychle ubíhá dozadu. Křídlo je rozdělené zhruba na třetiny. Střed je bez vzepětí a levé i pravé ucho s jedním stupněm vzepětí. Spoilery jsou dva na střední části blízko trupu. Každý je řízený zvlášť vlastním servem. Křídlo je rozebiratelné na 2 poloviny. Na kraji obou polovin je použito hliníkových trubiček, do kterých se zasune tyčová spojka křídel. Hlavní balsový nosník křídla je shora i zespodu opatřen uhlíkovými pásnicemi. Využito je i balsového D-boxu po celém rozpětí křídla.

Trup modelu je celý klasické konstrukce, řádně odlehčen velkými otvory v zadní části trupu. Na konci se nachází ocasní plochy do V, které jsou pomocí přípravku slepeny



Obrázek 3.13. Model RESoholic. [28]

| | |
|---------------------------------------|------------|
| Délka [mm] | 1 200 |
| Rozpětí [mm] | 2 000 |
| Profil | S4083 mod |
| Výška profilu – u kořene [mm] | neudává se |
| Hloubka křídla – u kořene [mm] | neudává se |
| Štíhlost křídla [-] | 12,5 |
| Plocha křídla [dm ²] | 32 |
| Hmotnost [g] | cca 450 |
| Plošné zatížení [g.dm ⁻²] | 14 |

Tabulka 3.14. Specifikace modelu RESoholic.[29]

mimo trup a následně se jako celek na trup přilepí. Ovládání ploch je řešeno bowdeny, které prochází vnitřkem trupu až k servům umístěným v přední části.

Kapitola 4

Velikost ocasních ploch

Velikost ocasních ploch má zásadní dopad na stabilitu a ovladatelnost celého modelu. Návrh velikosti a tvaru výškového a směrového kormidla se bude odvíjet od letadel uvedených v kapitole 3.2 – Modely kategorie RES.

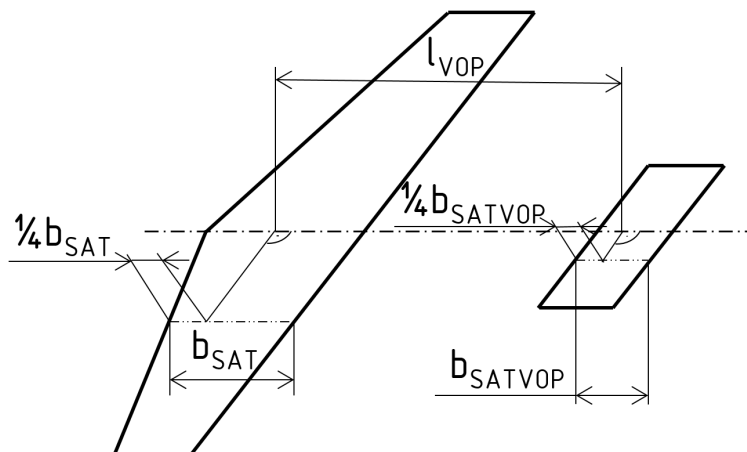
Hlavní parametry, na které bude nahlíženo, budou: štíhlost λ_{VOP} a mohutnost A_{VOP} vodorovné ocasní plochy a mohutnost směrové ocasní plochy A_{SOP} .

4.1 Mohutnost

Mohutnost je bezrozměrná vlastnost vycházející z geometrie půdorysu letadla, která dává do vztahu křídlo a jednu z ocasních ploch. Pro výškové kormidlo je popsána rovnicí:

$$A_{VOP} = \frac{S_{VOP} \cdot l_{VOP}}{S \cdot b_{SAT}} \quad (4.1)$$

V čitateli rovnice (4.1) figuruje plocha výškového kormidla S_{VOP} a délka ramene uvažovaná jako vzdálenost mezi $\frac{1}{4}$ střední aerodynamické tětivy křídla a $\frac{1}{4}$ střední aerodynamické tětivy výškového kormidla l_{VOP} . Ve jmenovateli se objevuje plocha křídla S a délka střední aerodynamické tětivy křídla b_{SAT} . [30] Tak jak je zakresleno v obrázku 4.1. Obdobně funguje výpočet i pro směrové kormidlo.



Obrázek 4.1. Výpočet mohutnosti. [30]

Pro výpočet mohutnosti je v první řadě nutné zjistit délku střední aerodynamické tětivy křídla a kormidla. Pro střední aerodynamickou tětivu křídla platí:

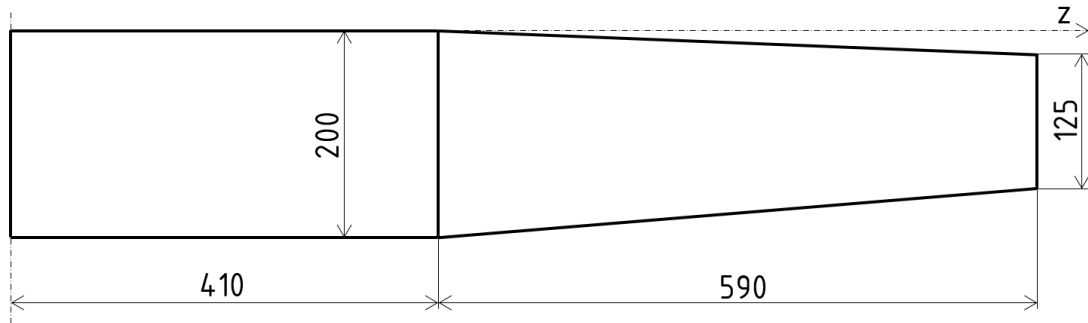
$$b_{SAT} = \frac{2}{S} \int_0^{L/2} b^2 dz \quad (4.2)$$

Ve vzorci (4.2) dochází k integraci přes funkci vyjadřující délku tětivy profilu křídla (v závislosti na vzdálenosti od trupu – z) po jedné polovině křídla. Celý integrál je vynásobený dvěma (ze symetrie), abychom dostali celé křídlo a vydělený plochou křídla.

Konkrétní výpočet je proveden pro model FRESH, protože jeho ocasní plochy jsou klasického uspořádání a lze tedy rovnou počítat jednotlivé mohutnosti. Není nutné převádět ocasní plochy do kolmých rovin, jak tomu je u motýlkových ocasních ploch. Výpočet vychází z návrhu prvního prototypu, který je zobrazen na obrázku 3.7.

4.1.1 Střední aerodynamická tětíva křídla

Zjednodušený náčrt pravé poloviny křídla tohoto modelu je znázorněn na obrázku 4.2.



Obrázek 4.2. Náčrt pravé poloviny křídla modelu FRESH.

Výpočet střední aerodynamické tětivy křídla modelu FRESH tedy vypadá následovně:

$$b_{SAT} = \frac{2}{S} \int_0^{L/2} b^2 dz = \frac{2}{S} \left[\int_0^{0,41} 0,2^2 dz + \int_0^{0,59} \left(0,2 - \frac{75}{590} z \right)^2 dz \right] \quad (4.3)$$

Po integraci:

$$b_{SAT} = \frac{2}{S} \left(\left[0,04z \right]_0^{0,41} + \left[0,04z - \frac{3}{59} \frac{z^2}{2} + \frac{225}{13\,924} \frac{z^3}{3} \right]_0^{0,59} \right) \quad (4.4)$$

Plocha křídla je $S = 0,354 \text{ m}^2$ a po dosazení:

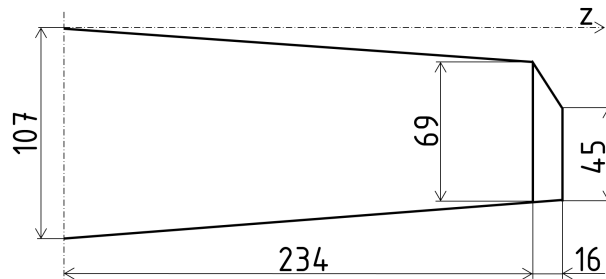
$$b_{SAT} = \frac{2}{0,354} \left[\left(0,04 \cdot 0,41 \right) + \left(0,04 \cdot 0,59 - \frac{3}{59} \frac{0,59^2}{2} + \frac{225}{13\,924} \frac{0,59^3}{3} \right) \right] \quad (4.5)$$

Výsledná střední aerodynamická tětíva křídla modelu FRESH je:

$$b_{SAT} = 0,18224 \text{ m} = 182,24 \text{ mm} \quad (4.6)$$

4.1.2 Mohutnost a štíhlost výškového kormidla

Stejně tak je nutné zjistit střední aerodynamickou tětívu výškového kormidla. Zjednodušený náčrt pravé poloviny kormidla je zobrazen na obrázku 4.3.



Obrázek 4.3. Náčrt pravé poloviny výškového kormidla modelu FRESH.

Výpočet střední aerodynamické tětivy výškového kormidla modelu FRESH tedy vypadá následovně:

$$b_{SATVOP} = \frac{2}{S_{VOP}} \int_0^{L_{VOP}/2} b_{VOP}^2 dz \quad (4.7)$$

$$b_{SATVOP} = \frac{2}{S_{VOP}} \left[\int_0^{0,234} \left(0,107 - \frac{38}{234}z \right)^2 dz + \int_0^{0,016} \left(0,069 - \frac{24}{16}z \right)^2 dz \right] \quad (4.8)$$

Po integraci:

$$b_{SATVOP} = \frac{2}{S_{VOP}} \left(\left[0,01145z - 0,034752 \frac{z^2}{2} + \frac{361}{13\,689} \frac{z^3}{3} \right]_0^{0,234} + \left[0,004761z - 0,207 \frac{z^2}{2} + \frac{9}{4} \frac{z^3}{3} \right]_0^{0,016} \right) \quad (4.9)$$

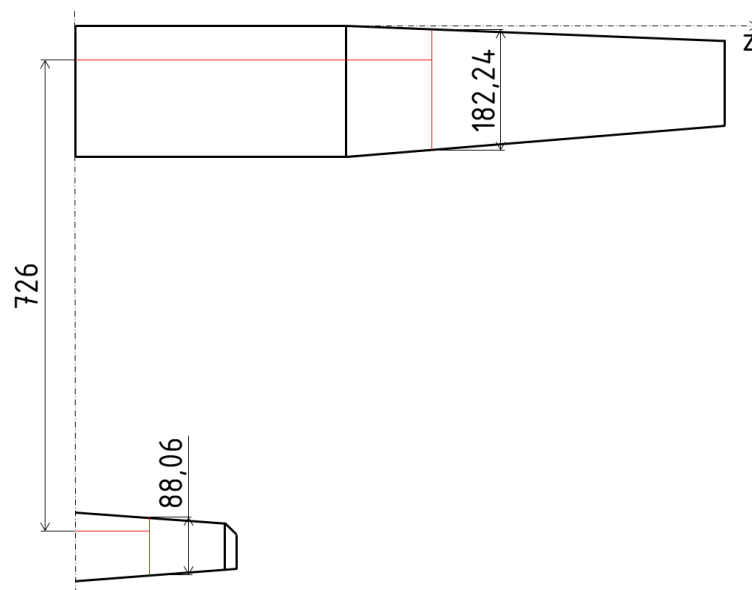
Plocha výškového kormidla je $S_{VOP} = 0,043 \text{ m}^2$. Dosazením do předchozí rovnice:

$$b_{SATVOP} = \frac{2}{0,043} \left[\left(0,01145 \cdot 0,234 - 0,034752 \frac{0,234^2}{2} + \frac{361}{13\,689} \frac{0,234^3}{3} \right) + \left(0,004761 \cdot 0,016 - 0,207 \frac{0,016^2}{2} + \frac{9}{4} \frac{0,016^3}{3} \right) \right] \quad (4.10)$$

Výsledná střední aerodynamická tětiva výškového kormidla modelu FRESH vychází:

$$b_{SATVOP} = 0,08806 \text{ m} = 88,06 \text{ mm} \quad (4.11)$$

Další postup je znázorněn na obrázku 4.1. Zakreslením výsledných délek středních aerodynamických tětív zpátky do nákresu křídla a výškovky je získána pozice této tětivy na křídle, resp. výškovém kormidle. Výpočtem $\frac{1}{4}$ z těchto středních aerodynamických tětív a vztyčením kolmice na osu trupu se získá vzdálenost těchto kolmic, což je poslední neznámá l_{VOP} ve vzorci pro výpočet mohutnosti VOP letadla.



Obrázek 4.4. Vzdálenost kolmic $\frac{1}{4}$ středních aerodynamických tětív modelu FRESH.

Konkrétní vzdálenost u modelu FRESH je zobrazena na obrázku 4.4 a vychází $l_{VOP} = 0,726 \text{ m}$.

Mohutnost VOP modelu FRESH tedy je:

$$A_{VOP} = \frac{S_{VOP} \cdot l_{VOP}}{S \cdot b_{SAT}} = \frac{0,043 \cdot 0,726}{0,354 \cdot 0,18224} = 0,484 \quad (4.12)$$

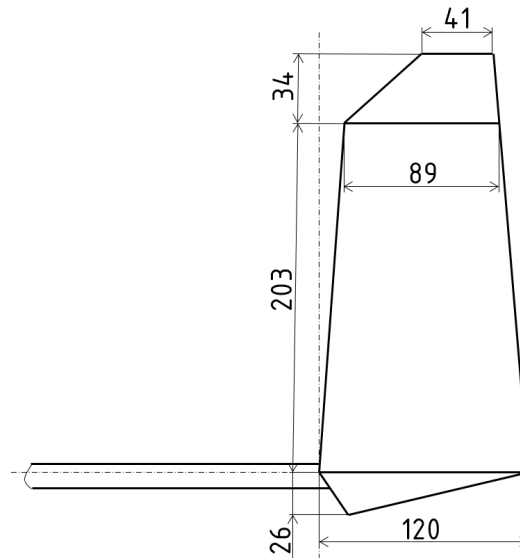
Štíhlost VOP se spočítá:

$$\lambda_{VOP} = \frac{L_{VOP}^2}{S_{VOP}} = \frac{0,5^2}{0,043} = 5,81 \quad (4.13)$$

Kde L_{VOP} v rovnici (4.13) je rozpětí výškového kormidla a S_{VOP} je jeho plocha.

4.1.3 Mohutnost směrového kormidla

Pro zjištění mohutnosti směrového kormidla je postup výpočtu podobný. Vypočítaná střední aerodynamická tětíva křídla zůstává stejná, je nutné dopočítat střední aerodynamickou tětívu směrového kormidla a příslušné rameno. To je provedeno ze zjednodušeného nákresu na obrázku 4.5.



Obrázek 4.5. Nákres směrového kormidla modelu FRESH.

Výpočet střední aerodynamické tětívy směrového kormidla modelu FRESH vypadá následovně:

$$b_{SAT SOP} = \frac{1}{S_{SOP}} \int_0^{0,263} b_{SOP}^2 dz = \frac{2}{S_{SOP}} \left[\int_0^{0,026} \left(\frac{120}{26} z \right)^2 dz + \int_0^{0,203} \left(0,12 - \frac{31}{203} z \right)^2 dz + \int_0^{0,034} \left(0,089 - \frac{48}{34} z \right)^2 dz \right] \quad (4.14)$$

Po integraci:

$$b_{SAT SOP} = \frac{1}{S_{SOP}} \left(\left[21,3 \frac{z^3}{3} \right]_0^{0,026} + \left[0,0144z - 0,03665 \frac{z^2}{2} + 0,02332 \frac{z^3}{3} \right]_0^{0,203} + \left[0,007921z - 0,251294 \frac{z^2}{2} + 0,023320 \frac{z^3}{3} \right]_0^{0,034} \right) \quad (4.15)$$

Plocha směrového kormidla je $S_{SOP} = 0,024985 \text{ m}^2$, výsledná délka střední aerodynamické tětiny vychází:

$$b_{SAT_{SOP}} = 0,09935 \text{ m} = 99,35 \text{ mm} \quad (4.16)$$

Délka ramene mezi kolmicí $\frac{1}{4}$ střední aerodynamické tětiny křídla na trup a kolmicí $\frac{1}{4}$ střední aerodynamické tětiny směrového kormidla na trup je $l_{SOP} = 0,844 \text{ m}$.

Výsledná mohutnost směrového kormidla vychází:

$$A_{SOP} = \frac{S_{SOP} \cdot l_{SOP}}{S \cdot b_{SAT}} = \frac{0,024985 \cdot 0,844}{0,354 \cdot 0,18224} = 0,327 \quad (4.17)$$

4.2 Porovnání parametrů ocasních ploch

Výpočet mohutností ocasních ploch a štíhlosti výškového kormidla bylo provedeno i pro další modely z kapitoly 3.2 této práce. Jedná se o ta letadla, u kterých byl dostupný výkres, stavební plán, popřípadě vhodná fotografie, na které je model vyfocen seshora a nejsou zakresleny potřebné rozměry.

U modelu PURES V2, který má motýlkové ocasní plochy, bylo pro výpočet mohutností nutné jednotlivé plochy promítnout pomocí příslušné goniometrické funkce do svislé roviny pro směrové kormidlo, respektive do vodorovné roviny pro výškové kormidlo. Výsledky jsou zaznamenány v tabulce 4.1.

| Název letadla | SAT křídla b_{SAT} [mm] | Štíhlost VOP λ_{VOP} [-] | Mohutnost VOP A_{VOP} [-] | Mohutnost SOP A_{SOP} [-] |
|---------------|------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| FRESH | 182,24 | 5,81 | 0,484 | 0,327 |
| PURES V2 | 189,02 | 4,95 | 0,546 | 0,280 |
| Samba R.E.S. | 180,18 | 5,47 | 0,288 | 0,188 |

Tabulka 4.1. Vlastnosti ocasních ploch modelů letadel.

Kapitola 5

Statistika modelů

Z porovnání jednotlivých modelů v tabulce 5.1 je na první pohled patrné, že model MADRES se od ostatních modelů výrazně odlišuje. Má nejmenší plochu křídla, největší štíhlost a nejnižší hmotnost. Vymyká se také svou koncepcí křídla. Není použito jednotlivých žebírek a potahu, ale křídlo je z jednoho kusu balsy (viz obrázek 3.8). Model bude z dalších porovnávání vyřazen.

| Název letadla | Profil | Plocha křídla [dm ²] | Štíhlost [-] | Plošné zatížení [g.dm ⁻²] |
|-------------------|----------------|-------------------------------------|-----------------|--|
| AndREaS | MB-674RES | 33,8 | 11,7 | 14,5 |
| Baba-Jaga Compet. | BC80-BC50-BC30 | 34,7 | 11,5 | 11,5 |
| FRESH | AG36-AG37 mod | 35,6 | 11,2 | 12,6 |
| MADRES | GT Synergy mod | 26,8 | 14,8 | 12,1 |
| Picares | AG Strak | 30,1 | 12,6 | 17,8 |
| PURES V2 | AG35-AG36 | 36,5 | 11,0 | 12,0 |
| RESoholic | S4083 mod | 32,0 | 12,5 | 14,0 |
| RESolution | S7012 | 34,8 | 11,3 | 17,0 |
| Samba R.E.S EVO | S3021 mod | 35,5 | 11,0 | 11,0 |
| Slite 2M RES | AG25-AG27 mod | 37,0 | 10,4 | 11,0 |
| X-RES | AG mod | 38,0 | 10,5 | 11,3 |

Tabulka 5.1. Porovnání důležitých parametrů jednotlivých modelů.

Plocha modelů kategorie RES se pohybuje v rozmezí 30–38 dm². Díky pravidly prakticky stanovenému rozpětí je na plochu přímo navázaná štíhlost křídla. Ta se pohybuje mezi 10,4–12,6.

Plošné zatížení je nemožné z nasbíraných dat objektivně stanovit. V některých případech bylo uváděno minimální dosažitelné plošné zatížení, v jiných případech to byla reálná hodnota už postaveného letadla. Co se týče hmotnosti, je jasné, že dnešní trend je stavět lehká letadla s balastní šachtou. To znamená letová hmotnost okolo 400–450 g s možností dovážet o další desítky gramů. Lze tak pokrýt větší škálu povětrnostních podmínek.

Díky možnosti účastnit se se dvěma letadly během jedné soutěže lze uvažovat i o použití dvou odlišných letadel. Jedno výkonné pro klidné podmínky a druhé trochu těžší (popřípadě ještě doplněné balastní šachtou) a pronikavější do většího větru.

Z tabulky 5.2 plyne, že má většina modelů obdélníkovou střední část křídla. Velmi často je tato část zároveň bez vzepětí a dvojitě lomení nastává až na koncích křídel. Výjimku tvoří modely AndREaS a RESolution, které mají vzepětí přímo od trupu. Úhel prvního stupně vzepětí se pohybuje v rozmezí 7–10°, nejčastěji pak 10°. Úhel druhého vzepětí se výrazně liší model od modelu a nelze tedy jednoduše zobecnit.

Přehled vlastností ocasních ploch vybraných modelů je uveden v kapitole 4.2.

| Název letadla | Hloubka křídla u kořene [mm] | Obdélníková střední část | Počet lomení | Úhly lomení [°] |
|-----------------------|---------------------------------|-----------------------------|-----------------|--------------------|
| AndREaS | – | ANO | 2 | – |
| Baba-Jaga Competition | 209 | ANO | 2 | 7 + 10 |
| FRESH | 200 | ANO | 2 | 10 + ? |
| MADRES | 162 | NE | 2 | 8,5 + 24 |
| Picares | 175 | ANO | 2 | – |
| PURES V2 | 212 | ANO | 2 | 10 + 16 |
| RESoholic | – | NE | 2 | – |
| RESolution | 187 | ANO | 2 | – |
| Samba R.E.S EVO | 193 | ANO | 2 | 10 + 10 |
| Slite 2M RES | – | ANO | 2 | 8 + 12 |
| X-RES | – | ANO | 2 | 10 + 12 |

Tabulka 5.2. Porovnání parametrů křídel jednotlivých RES modelů.

Kapitola 6

Výběr profilu křídla

Hlavním cílem této pasáže je správný výběr profilu s malým minimálním opadáním a vysokou klouzavostí v letové fázi.

K porovnání jednotlivých koncepcí byl využit program XLFR5 ve verzi 6.39. Jedná se o nástroj umožňující analýzu profilů, křídel i celých letadel na nízkých Reynoldsových číslech.

Vstupní parametry vycházejí z kapitoly 5 Statistika modelů.

6.1 Profily a provozní podmínky

V první řadě je nutné vybrat seznam profilů, které budou předmětem numerické studie. Na základě sesbíraných dat jednotlivých již létajících modelů byly vybrány všechny profily, jejichž souřadnice byly volně dostupné. K nim byly následně přidány další profily, které by mohly být pro porovnání zajímavé. Prvním z nich je velmi známý profil E205. Dále byl přidán profil BE50, který se používá zejména u volných modelů kategorie F1A. Jedná se o kategorii pomalu létajících lehkých volných modelů s rozpětím křídel 2–2,5 m, plochou křídla okolo 30 dm² a velkou štíhlostí okolo 18. Zajímavý by mohl být i profil AG03, a to z hlediska jednoduché stavby letadla. Má rovnou spodní hranu a je tedy možné stavět křídlo na rovné desce. Posledním přidaným, nad rámec již používaných profilů u modelů kategorie RES, je profil SA7036.

Seznam všech vybraných profilů, které byly podrobeny analýze je uveden níže. Jednotlivé profily jsou zobrazeny v příloze A. Jedná se o nemodifikované profily.

- AG03
- AG25, AG27
- AG34, AG35, AG36, AG37
- BC30, BC50, BC70
- BE50
- E205
- S3021
- S4083
- S7012
- SA7036

Jednotlivé profily byly nahrány do softwaru XFRL5 a byla provedena analýza každého profilu zvlášť. XFRL5 k tomu využívá program Xfoil, který je vytvořen pro návrh a analýzu profilů podzvukových rychlostí.

Pro správné nastavení výpočtu bylo nutné stanovit Reynoldsova čísla a úhly náběhu, pro které má cyklus proběhnout.

Pro stanovení přibližně nejnižšího možného Reynoldsova čísla na křídle je třeba stanovit minimální rychlost, kterou letadlo této kategorie poletí. Tu lze zjistit z rovnosti velikosti síly vztlakové a tíhové. Z rovnice rovnováhy tedy plyne:

$$F_G = F_L \quad (6.1)$$

$$m \cdot g = \frac{1}{2} C_L S \rho v_{min}^2 \quad (6.2)$$

Vyjádřením rychlosti ze vzorce vznikne rovnici (6.3). Zde volím součinitel vztlaku $C_L = 1$, hmotnost $m = 450 \text{ g}$, plochu křídla $S = 36 \text{ dm}^2$. Hustota vzduchu je $\rho = 1,225 \text{ kg.m}^{-3}$, která odpovídá 0 m mezinárodní standardní atmosféry při teplotě $t = 15^\circ\text{C}$.

$$v_{min} = \sqrt{\frac{2mg}{C_L S \rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,45 \cdot 9,81}{1 \cdot 0,36 \cdot 1,225}} = 4,47 \text{ m.s}^{-1} \quad (6.3)$$

Další neznámou ve výpočtu Reynoldsova čísla je hloubka křídla. Minimální hodnoty Re je dosaženo na koncích křídel, protože mají nejmenší délku tětivy. Například model FRESH má na úplném konci křídla tětivu dlouhou 85 mm, model Samba 130 mm, PURES V2 115 mm.

Hodnota dynamické viskozity je $\nu = 1,461 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ při 0 m MSA, minimální hloubka křídla $b_{min} = 0,085 \text{ m}$ a minimální rychlost $v_{min} = 4,47 \text{ m.s}^{-1}$ z rovnice (6.3). Potom výpočet minimálního Re vypadá takto:

$$Re_{min} = \frac{v_{min} \cdot b_{min}}{\nu} = \frac{4,47 \cdot 0,085}{1,461 \cdot 10^{-5}} = 26\,006,2 \quad (6.4)$$

Pro stanovení přibližně nejvyššího možného Reynoldsova čísla byla použita délka tětivy u kořene křídla. Největší hodnotu má z modelů zkoumaných v kapitole 5 Statistika modelů letadlo PURES V2, a to 212 mm. Počítám s maximální rychlostí letu $v_{max} = 35 \text{ m.s}^{-1}$, hloubkou $b_{max} = 0,212 \text{ m}$. Dynamická viskozita zůstává stejná jako v předchozím výpočtu.

$$Re_{max} = \frac{v_{max} \cdot b_{max}}{\nu} = \frac{35 \cdot 0,212}{1,461 \cdot 10^{-5}} = 507\,871,3 \quad (6.5)$$

Rozsah Reynoldsových čísel volím s rezervou $Re = \langle 15\,000; 750\,000 \rangle$. Pro výpočet jednotlivých polár volím tato Reynoldsova čísla:

$$Re = \{10\,000; 20\,000; 30\,000; 40\,000; 60\,000; 80\,000; 100\,000; \\ 130\,000; 160\,000; 200\,000; 300\,000; 500\,000; 750\,000\}$$

Dalším parametrem, který je třeba stanovit, je úhel náběhu α . Volím α od -6° do 10° s krokem $0,25^\circ$.

Program následně pro nejnižší Reynoldsovo číslo projde postupně jednotlivé úhly náběhu a spočítá body poláry. Poté zvýší Reynoldsovo číslo na další stanovenou hodnotu v pořadí a cyklus se opakuje. V určitých případech, zejména při nízkých Re a vysokých úhlech náběhu, se může stát, že křivka poláry bude značně nehladká. Řešením může být změna kroku úhlu náběhu. Proto je potřeba pro proběhnutí automatického výpočtu polár zkontrolovat každý profil a pokusit se případné problémy opravit.

6.2 Model pro rychlostní poláry

Pro srovnání jednotlivých profilů vůči sobě byl vybrán způsob porovnání rychlostních polár celého letadla. Tato křivka představuje závislost rychlosti opadání větroně na horizontální rychlosti letu.

Tím vzniká potřeba definovat geometrii křídla, ocasních ploch, hmotnost letadla a odpor trupu.

Hmotnost letadla byla zvolena $m = 450 \text{ g}$ s těžištěm v $\frac{1}{3}$ profilu u kořene křídla.

6.2.1 Trup a jeho odpor

Tvar a délka trupu byla převzata z modelu Samba R.E.S. 2. Při stanovování odporu trupu jsem se řídil postupem uvedeným v literatuře [30].

Reynoldsovo číslo trupu:

$$Re_{trup} = \frac{v \cdot L_{trup}}{\nu} = \frac{6 \cdot 1,08}{1,461 \cdot 10^{-5}} = 443\,531,8 \quad (6.6)$$

Součinitel odporu vztažený na povrch trupu se skládá z dílčích odporů. V rovnici (6.7) figurují postupně tyto vlivy: tření, hladkost povrchu, poloha maximální tloušťky trupu. Hodnoty jednotlivých součinitelů jsou převzaty z literatury [30].

$$C_{Dpovrch} = 0,0040 + 0,0010 + 0,0008 = 0,0058 \quad (6.7)$$

Největší průřez trupu vychází měřením z plánku na obrázku 3.4 ve vzdálenosti $e = 240 \text{ mm}$ od špičky trupu s plochou $S_{Dtr} = 0,00225 \text{ m}^2$.

K výpočtu součinitele tření bude dále potřeba velikost omočeného povrchu. Trup se skládá z gondoly v přední části, která pokračuje až za křídlo, a z uhlíkové trubky, která tvoří zadní část trupu. Ta má délku $l = 500 \text{ mm}$ a vnější průměr $D = 10 \text{ mm}$. Její omočená plocha se tedy spočítá jako plocha pláště válce:

$$S_{trubka} = \pi \cdot D \cdot l = \pi \cdot 0,01 \cdot 0,5 = 0,0157 \text{ m}^2 \quad (6.8)$$

Všechny plochy gondoly byly změřeny z plánku na obrázku 3.4 a jsou uvedené v tabulce 6.1.

| | |
|--------------------------------------|--------|
| Horní část gondoly [m ²] | 0,0192 |
| Bočnice gondoly [m ²] | 0,0184 |
| Trubka [m ²] | 0,0157 |

Tabulka 6.1. Omočená plocha jednotlivých částí trupu.

Horní část je totožná se spodní částí. Celá omočená plocha trupu je součet všech částí:

$$S_{otr} = 2 \cdot S_{horni} + 2 \cdot S_{bočnice} + S_{trubka} \quad (6.9)$$

$$S_{otr} = 2 \cdot 0,0192 + 2 \cdot 0,0184 + 0,0157 = 0,091 \text{ m}^2 \quad (6.10)$$

Nyní už lze provést přepočítání součinitele povrchového tření na součinitel odporu vztažený na největší průřez trupu:

$$C_{Dtreni} = \frac{C_{Dpovrch} \cdot S_{otr}}{S_{Dtr}} = \frac{0,0058 \cdot 0,091}{0,00225} = 0,235 \quad (6.11)$$

Přičtením tvarového součinitele odporu holého trupu $C_{Dtvar} = 0,09$ vychází:

$$C_{Dtrup} = C_{Dtreni} + C_{Dtvar} = 0,235 + 0,09 = 0,325 \quad (6.12)$$

Dále je potřeba zahrnout nedokonalosti vzniklé šterbinou kabiny, háčku zespodu trupu apod. Proto byl zvolen další součinitel $C_{DP} = 0,035$.

$$C_{Dcelytrup} = C_{Dtrup} + C_{DP} = 0,325 + 0,035 = 0,36 \quad (6.13)$$

Součinitel odporu trupu vztažený na plochu křídla při malých úhlech náběhu je:

$$C_{Dtr} = \frac{C_{Dcelytrup} \cdot S_{Dtr}}{S} = \frac{0,36 \cdot 0,00225}{0,36} = 0,00225 \quad (6.14)$$

6.2.2 Křídlo

Pro prvotní návrh bylo vybráno obdélníkové křídlo bez vzepětí, které využívá maximální dovolené rozpětí 2 000 mm s plochou $S = 36 \text{ dm}^2$. Z toho vyplývá konstantní hloubka křídla 180 mm. Po celé délce byl vždy použit stejný profil. Plošné zatížení při hmotnosti $m = 450 \text{ g}$ vychází $12,5 \text{ g.dm}^{-2}$.

6.2.3 Ocasní plochy

Bylo zvoleno klasické uspořádání ocasních ploch. VOP je lehce předsazena směrovému kormidlu. Tvar ploch prototypu letadla vychází z modelu FRESH, velikost je však přepracována. Profil ocasních ploch byl volen z řady NACA 000X. Jedná se o souměrný profil s výsledky velmi podobnými rovné desce, která bude na ocasní plochy skutečně použita. Poslední číslo v profilu bylo voleno s ohledem na maximální tloušťku profilu 4 mm tak, aby bylo možné použít prkénko balsy o tloušťce 4 mm.

Výškové kormidlo má lichoběžníkový tvar. U kořene je hloubka profilu b_{VOP} 105 mm s profilem NACA 0003 a na koncích, které jsou od středu vzdáleny 245 mm, je hloubka profilu NACA 0006 $b_{VOP} = 65 \text{ mm}$. Plocha výškového kormidla tedy vychází $S_{VOP} = 4,16 \text{ dm}^2$. Štíhlost VOP je $\lambda_{VOP} = 5,76$. Mohutnost výškového kormidla byla zvolena $A_{VOP} = 0,5$. Jeho náběžná hrana je vzdálena 800 mm od náběžné hrany křídla.

Směrové kormidlo má mohutnost $A_{SOP} = 0,3$ a jeho náběžná hrana se nachází 850 mm od náběžné hrany křídla. Výška kormidla je 225 mm. Hloubka u kořene je $b_{SOP} = 120 \text{ mm}$ s profilem NACA 0003. Ve vzdálenosti 205 mm od kořene je hloubka profilu NACA 0004 $b_{SOP} = 90 \text{ mm}$ a na úplné konci je použit profil NACA 0006 $b_{SOP} = 60 \text{ mm}$. Plocha SOP je $S_{SOP} = 2,3 \text{ dm}^2$.

6.3 Rychlostní poláry

Po provedení celé simulace byla získána pro každý profil rychlostní polára. Z ní bylo odečteno minimální opadání a maximální klouzavost, které je letadlo schopno s daným profilem dosáhnout.

6.3.1 Minimální opadání a maximální klouzavost

Rychlostní polára je na začátku omezena pádovou rychlostí. Minimální opadání je minimum z vertikální rychlosti. Toto minimum se nachází velmi blízko pádové rychlosti. Model vyladěný na minimální opadání může snadno poryvem větru přejít do pádu tím, že vlivem svislé složky poryvu překročí kritický úhel náběhu. Popřípadě může tato situace nastat i při hrubém zásahu pilota při řízení výškovým kormidlem. [30]

Maximální klouzavost je vlastnost, kdy je podíl C_L/C_D maximální. Při maximální klouzavosti je úhel klouzání minimální a větroň v této konfiguraci uletí z dané výšky největší vzdálenost. Bod příslušící maximální klouzavosti lze získat konstrukcí tečny na rychlostní poláru z počátku souřadného systému.

Oba dva parametry jsou pro větroně kategorie RES velmi důležité. Minimální opadání přímo ovlivňuje dobu, kterou se letadlo udrží ve vzduchu. Čím je rychlost opadání menší, tím letadlo vypuštěné ze stejné výšky vydrží déle ve vzduchu. Oproti tomu vysoká klouzavost umožňuje efektivně přeletět na jiné místo, a tím urychlit hledání stoupavých proudů.

6.3.2 Porovnání vlastností profilů

Výsledky jednotlivých profilů používaných v kategorii RES jsou velmi podobné. Jednotlivé hodnoty minimálního opadání a maximální klouzavosti daných profilů jsou vypsány v tabulce 6.2.

| Profil | Minimální opadání [m.s ⁻¹] | Maximální klouzavost [-] | Profil | Minimální opadání [m.s ⁻¹] | Maximální klouzavost [-] |
|--------|--|--------------------------|--------|--|--------------------------|
| AG03 | 0,298 | 18,7 | BC50 | 0,283 | 18,55 |
| AG25 | 0,280 | 18,1 | BC70 | 0,284 | 18,0 |
| AG27 | 0,277 | 18,7 | BE50 | 0,275 | 17,6 |
| AG34 | 0,297 | 16,9 | E205 | 0,395 | 15,4 |
| AG35 | 0,292 | 17,3 | S3021 | 0,310 | 15,5 |
| AG36 | 0,289 | 17,65 | S4083 | 0,292 | 18,3 |
| AG37 | 0,288 | 18,1 | S7012 | 0,292 | 17,3 |
| BC30 | 0,277 | 18,8 | SA7036 | 0,293 | 16,7 |

Tabulka 6.2. Minimální opadání a maximální klouzavost modelu s různými profily při hmotnosti $m = 450 \text{ g}$.

Pro lepší přehlednost a možnost srovnání jednotlivých profilů je na obrázku 6.1 vynesena Paretův graf. Na vodorovné ose se nachází minimální opadání a na svislé maximální klouzavost. Ideální profil by měl dosahovat co nejmenší hodnoty na ose X a maximální hodnoty na ose Y. Lze tedy říci, že profily nacházející se blíže levému hornímu okraji grafu jsou vhodné a naopak ty v pravém dolním rohu krajně nevhodné.

V grafu na obrázku 6.1 není zobrazen profil E205, protože se svými hodnotami velmi odlišoval od ostatních profilů (viz tabulka 6.2). V obou parametrech byl výrazně horší než všechny ostatní analyzované profily a zanesením do grafu by nebyly dobře patrné rozdíly mezi ostatními profily.

Profil BE50, používaný u letadel kategorie F1A, vyniká nejmenším opadáním z analyzovaných profilů, ale nedosahuje takových hodnot maximální klouzavosti jako velká část konkurentů.

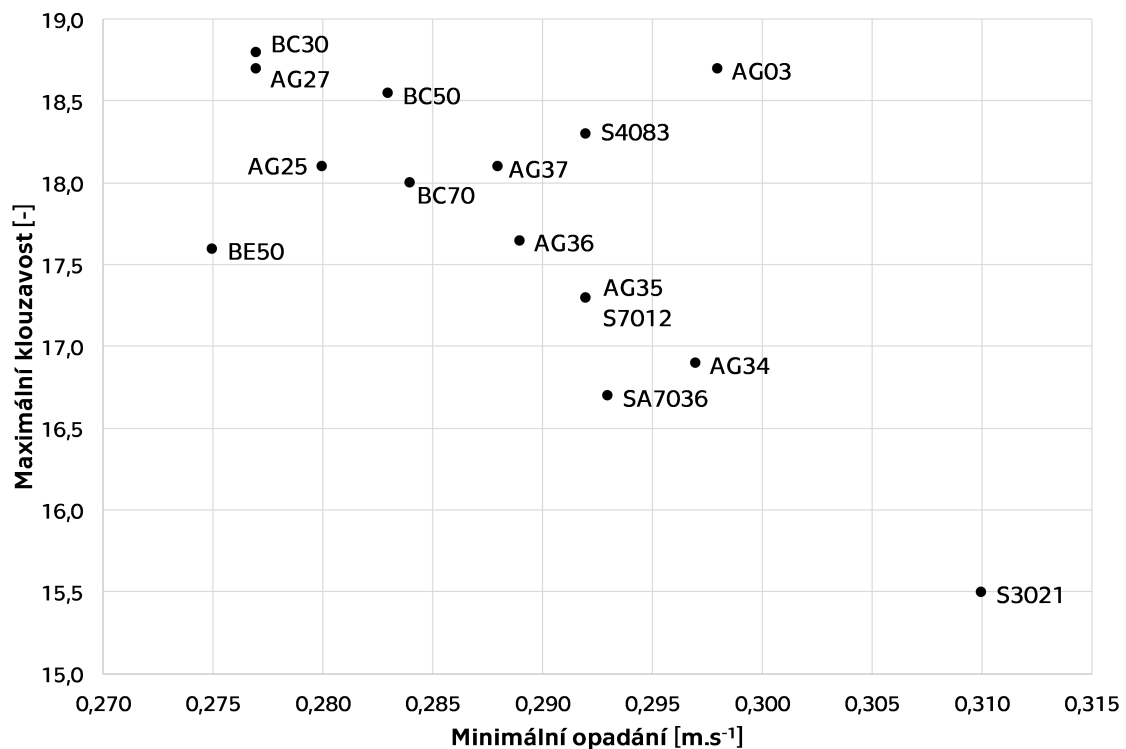
Profil AG03 s rovnou spodní hranou vyniká výbornou klouzavostí, která je totožná s profilem AG27 a prakticky stejná s profilem BC30. Bohužel zaostává v minimálním opadání zhruba o $0,02 \text{ m.s}^{-1}$.

Nejlepšími profily se jeví být profily BC30, AG27, BC50. Naopak nejhorší parametry jevil profil S3021 a již zmíněný E205.

6.3.3 Model zatížený balastem

Předpokládat pouze dokonalé povětrnostní podmínky není možné. Proto je velmi výhodné zjistit, jaké výkony bude letadlo s daným profilem podávat za vyššího větru s vyšší hmotností. Pro představu, jak se jednotlivé profily budou v takových podmínkách chovat, byla přidána dodatečná zátěž do těžiště o velikosti 200 g a provedena další analýza. Nyní má testovaný model hmotnost 650 g a plošné zatížení se zvýšilo na $18,06 \text{ g.dm}^{-2}$. Geometrie letadla zůstala totožná.

Do tabulky 6.3 byl oproti tabulce 6.2 přidán další sloupec, který popisuje opadání modelu při horizontální rychlosti 20 m.s^{-1} .



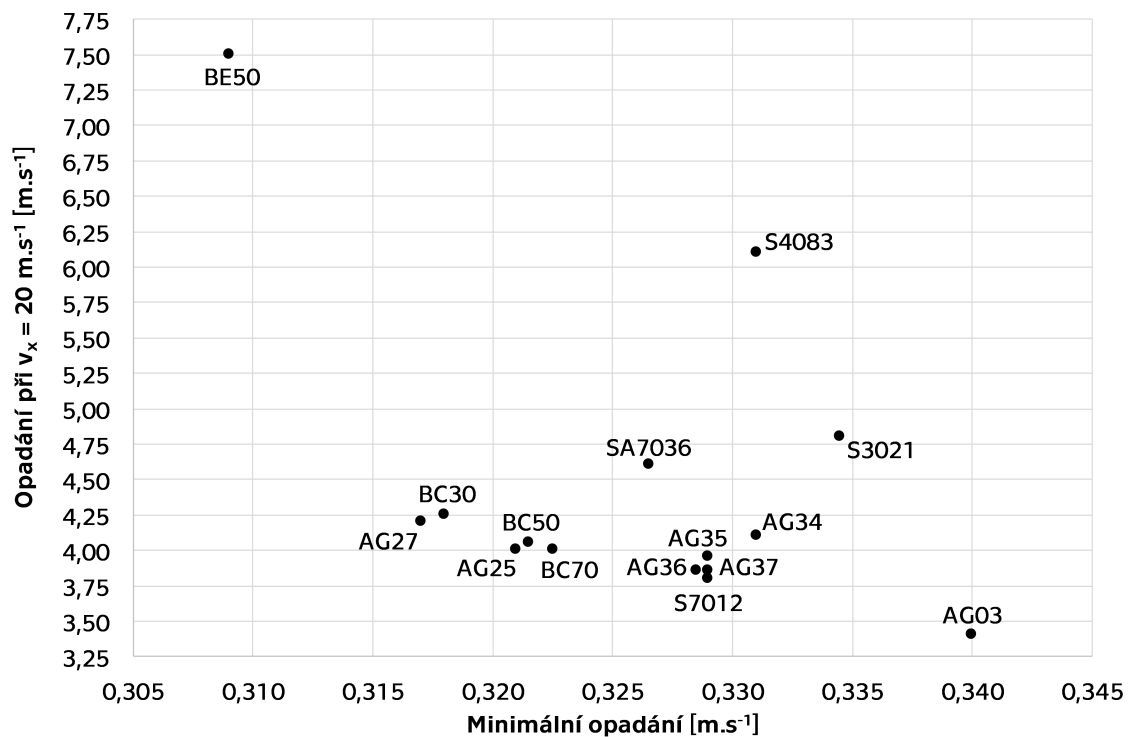
Obrázek 6.1. Paretův graf minimálního opadání a maximální klouzavosti při hmotnosti letadla $m = 450 \text{ g}$.

| Profil | Minimální opadání [m.s ⁻¹] | Opadání při 20 m.s ⁻¹ [m.s ⁻¹] | Maximální klouzavost [-] | Profil | Minimální opadání [m.s ⁻¹] | Opadání při 20 m.s ⁻¹ [m.s ⁻¹] | Maximální klouzavost [-] |
|--------|--|---|--------------------------|--------|--|---|--------------------------|
| AG03 | 0,34 | 3,4 | 20,0 | BC50 | 0,3215 | 4,05 | 19,9 |
| AG25 | 0,321 | 4,0 | 19,6 | BC70 | 0,3225 | 4,0 | 19,5 |
| AG27 | 0,317 | 4,2 | 20,1 | BE50 | 0,309 | 7,5 | 19,0 |
| AG34 | 0,331 | 4,1 | 18,6 | E205 | 0,357 | 4,25 | 16,85 |
| AG35 | 0,329 | 3,95 | 18,9 | S3021 | 0,3345 | 4,8 | 17,5 |
| AG36 | 0,3285 | 3,85 | 19,15 | S4083 | 0,331 | 6,1 | 19,5 |
| AG37 | 0,329 | 3,85 | 19,4 | S7012 | 0,329 | 3,8 | 18,9 |
| BC30 | 0,318 | 4,25 | 20,15 | SA7036 | 0,3265 | 4,6 | 18,45 |

Tabulka 6.3. Minimální opadání a maximální klouzavost modelu s různými profily při hmotnosti $m = 650 \text{ g}$.

Na obrázku 6.2 je Paretův graf pro zatížené letadlo. Na vodorovné ose je vyneseno minimální opadání v m.s^{-1} , na svislé ose je vyneseno opadání v m.s^{-1} při horizontální rychlosti $v_x = 20 \text{ m.s}^{-1}$.

Sledované opadání při horizontální rychlosti 20 m.s^{-1} by mělo být co nejmenší. To znamená, aby letadlo bylo schopné této rychlosti dosáhnout a stále bylo výkonostně konkurenceschopné. Nejlépe se tedy jeví profily umístěné v levém spodním rohu Paretova grafu na obrázku 6.2. Je patrné, že profil BE50 má skoro až dvojnásobné opadání při horizontální rychlosti 20 m.s^{-1} oproti většině ostatních profilů.

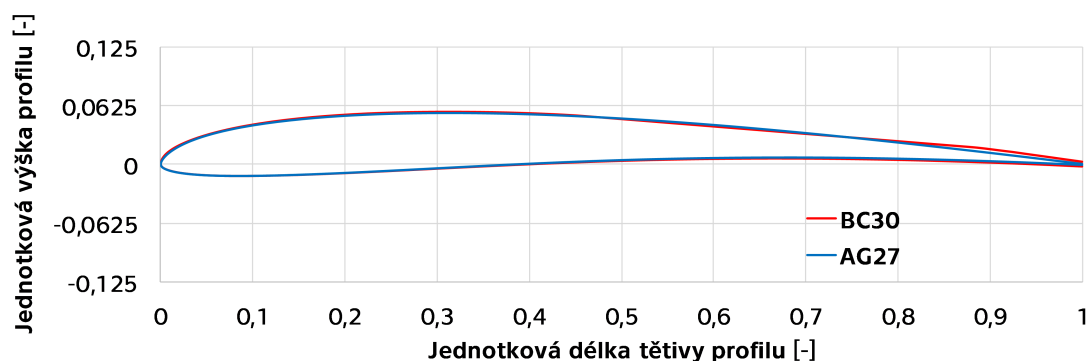


Obrázek 6.2. Paretův graf minimálního opadání a opadání při horizontální rychlosti 20 m.s^{-1} při hmotnosti letadla $m = 650 \text{ g}$.

Profily AG27 a BC30 se stejně jako v předchozím grafu umísťují blízko sebe. Nejmenší opadání při horizontální rychlosti 20 m.s^{-1} jeví profil AG03, ale za cenu nejhoršího minimálního opadání ze všech analyzovaných profilů.

6.4 Profily AG27 a BC30

Profily AG27 a BC30 si jsou dosti podobné, jak lze vidět na obrázku 6.3, jeden prakticky překrývá ten druhý. Pro další postup návrhu křídla modelu kategorie RES byl zvolen profil BC30. Jeho souřadnice jsou uvedeny v příloze B, jeho specifikace pak v tabulce 6.4.



Obrázek 6.3. Profily AG27 a BC30.

| | |
|--------------------------------|-------|
| Maximální tloušťka profilu [%] | 6,25 |
| Poloha maximální tloušťky [%] | 22,23 |
| Maximální křivost profilu [%] | 2,71 |
| Poloha maximální křivosti [%] | 41,42 |

Tabulka 6.4. Specifikace profilu BC30.

Kapitola 7

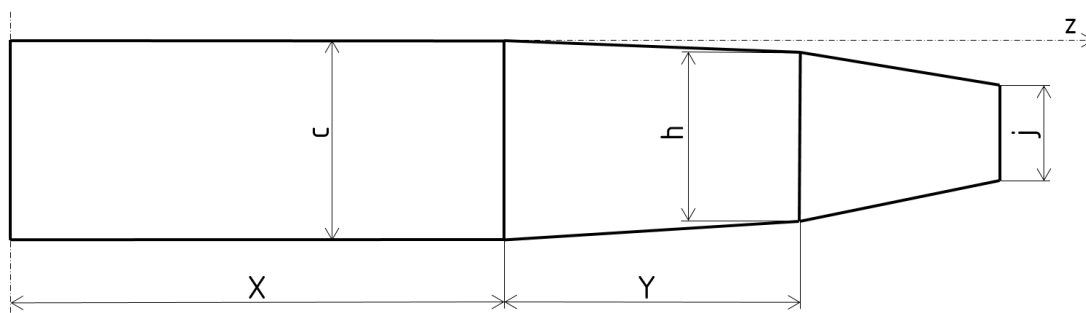
Návrh geometrie křídla

Po výběru profilu křídla následuje volba tvaru křídla. K tomu bylo využito parametrizace jednotlivých rozměrů a následná analýza těchto geometrií v programu XFLR5.

7.1 Parametrizace rozměrů

Většina modelů z kapitoly 3.2 má každou polovinu křídla dělenou do 3 částí. Středová část je obdélníková, dvě koncové části lichoběžníkové. Pro prvotní návrh optimálního tvaru křídla byla použita parametrizace 4 proměnných, které definují pátou neznámou, čímž je délka koncového žebra.

Parametr X definuje délku obdélníkové části jedné poloviny křídla, parametr Y definuje délku první lichoběžníkové části křídla. Parametry c , h a j definují délku tětiny koncových žebor jednotlivých částí tak, jak je zobrazeno na obrázku 7.1.



Obrázek 7.1. Parametrizace křídla.

Hodnoty vstupních parametrů byly zvoleny na základě rozměrů odečtených z výkresů z kapitoly 3.2. Všechny hodnoty jsou uvedeny v mm:

$$X = \{300, 350, 400, 450, 500\}$$

$$Y = \{200, 300, 400\}$$

$$c = \{190, 210, 230\}$$

$$h = \{180, 150, 130\}$$

Z takto zvolené parametrizace pak pro polovinu plochy křídla S platí:

$$\frac{S}{2} = c \cdot X + \frac{c+h}{2} \cdot Y + \frac{h+j}{2} \cdot \left(\frac{L}{2} - X - Y\right) \quad (7.1)$$

Kde L je rozpětí křídla. Vyjádření délky tětiny koncového žebra j ze vzorce (7.1):

$$j = \frac{\frac{S}{2} + X \left(\frac{h}{2} - c\right) - Y \frac{c}{2} - \frac{L}{4} h}{\frac{L}{4} - \frac{X+Y}{2}} \quad (7.2)$$

Rozpětí křídla je maximální $L = 2\,000\text{ mm}$, plocha zůstává stejná jako v kapitole 6 $S = 36\text{ dm}^2$. Křídlo je rovné, bez vzepětí. Odpor trupu, hmotnost i mohutnosti ocasních ploch jsou stejné jako při výběru profilu.

Postupným dosazením jednotlivých vstupních parametrů jsou získány hodnoty rozměru koncového žebra j . Z nich pak vybírám takové rozvržení, které splňuje podmínku $h \geq j$, a zároveň $j \geq 70\text{ mm}$. Druhá podmínka ošetřuje problém s nízkými Reynoldsovými čísly na konci křídla.

7.2 Výsledky parametrizace

Vznikne celkem 29 variant, z toho 11 variant pro délku tětiny profilu obdélníkové části $c = 190\text{ mm}$, 12 variant pro $c = 210\text{ mm}$ a 6 pro $c = 230\text{ mm}$. Rozmezí minimálního opadání a maximální klouzavosti, ve kterých se jednotlivá křídla pohybovala, jsou uvedena v tabulce 7.1.

| Délka tětiny obdélníkové části c [mm] | Minimální opadání [m.s ⁻¹] | Maximální klouzavost [-] |
|---|--|--------------------------|
| 190 | 0,2710–0,2755 | 18,96–19,04 |
| 210 | 0,2675–0,2715 | 19,10–19,17 |
| 230 | 0,2695–0,2730 | 18,97–19,08 |

Tabulka 7.1. Klouzavost a minimální opadání parametrizovaných křídel při hmotnosti modelu $m = 450\text{ g}$.

Z tabulky 7.1 je patrné, že optimální tvar křídla se pohybuje okolo hodnoty $c = 210\text{ mm}$. Ze všech kombinací vyšlo nejlépe křídlo s rozměry: $X = 350\text{ mm}$, $Y = 500\text{ mm}$, $c = 210\text{ mm}$, $h = 150\text{ mm}$, $j = 70\text{ mm}$, které dosahuje maximální klouzavosti 19,17 a minimálního opadáním 0,2675 m.s⁻¹.

U křídel s délkou tětiny obdélníkové části $c = 230\text{ mm}$ vzniká díky velké štíhlosti koncových lichoběžníkových částí nevhodné rozložení součinitele vztlaku po rozpětí. Maximum C_L se nachází 700–800 mm od středu křídla, což je místo, kde dojde k prvnímu odtržení obtékaného proudu vzduchu. Když je toto maximum vzdáleného daleko od trupu, získává letadlo nežádoucí pádové vlastnosti. Proto je vhodné umístit maximum C_L co možná nejbližší trupu.

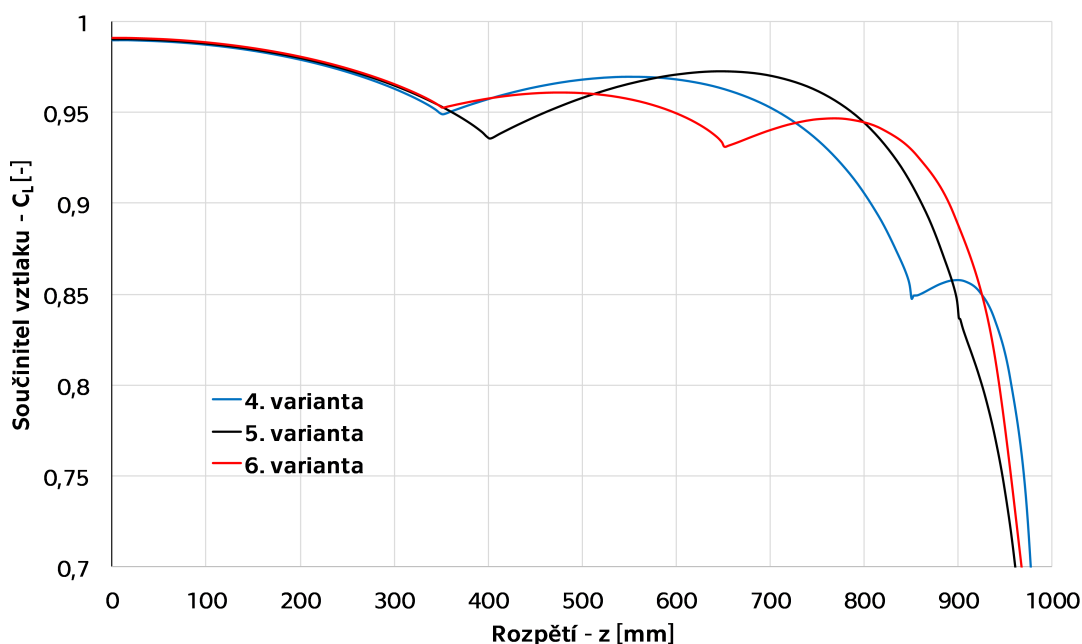
Nejlepšího rozložení C_L po rozpětí dosahují tvary s $c = 190\text{ mm}$. Tvar křídla se blíží obdélníku a vztlak je velmi podobný elipsovému rozložení. To znamená, že pro všechny kombinace v této délce tětiny vychází maximum C_L do středu křídla, což je optimální. V maximální klouzavosti a minimálním opadání se však křídly s $c = 210\text{ mm}$ nevyrovnají.

V tabulce 7.2 je přehled tří nejlepších geometrií pro délku tětiny obdélníkové části $c = 190\text{ mm}$ a tří nejlepších pro délku tětiny obdélníkové části $c = 210\text{ mm}$, které plynou z parametrizace.

Z grafu na obrázku 7.2 je patrné, že nejlepší rozložení C_L po rozpětí z hlediska druhého maxima C_L vykazuje varianta číslo 6 z tabulky 7.2, předpokládáme-li rozložení hodnot C_{Lmax} profilu po rozpětí pro každé křídlo stejné. Hodnoty C_L vynesené v grafu přísluší úhlu náběhu $\alpha = 8^\circ$.

| Varianta | Délka tětiny obdélníkové části c [mm] | X [mm] | Y [mm] | h [mm] | j [mm] | Minimální Opadání [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] | Maximální klouzavost [-] |
|----------|---|----------|----------|----------|----------|--|--------------------------|
| 1. | 190 | 500 | 300 | 180 | 115 | 0,2707 | 19,04 |
| 2. | 190 | 350 | 500 | 180 | 100 | 0,2710 | 19,03 |
| 3. | 190 | 350 | 400 | 180 | 136 | 0,2720 | 19,03 |
| 4. | 210 | 350 | 500 | 150 | 70 | 0,2675 | 19,17 |
| 5. | 210 | 400 | 500 | 130 | 90 | 0,2695 | 19,15 |
| 6. | 210 | 350 | 300 | 180 | 94,3 | 0,2675 | 19,14 |

Tabulka 7.2. Vlastnosti vybraných geometrií na základě parametrizace.



Obrázek 7.2. Součinitel vztlaku v závislosti na rozpětí pro různé geometrie křídla z tabulky 7.2.

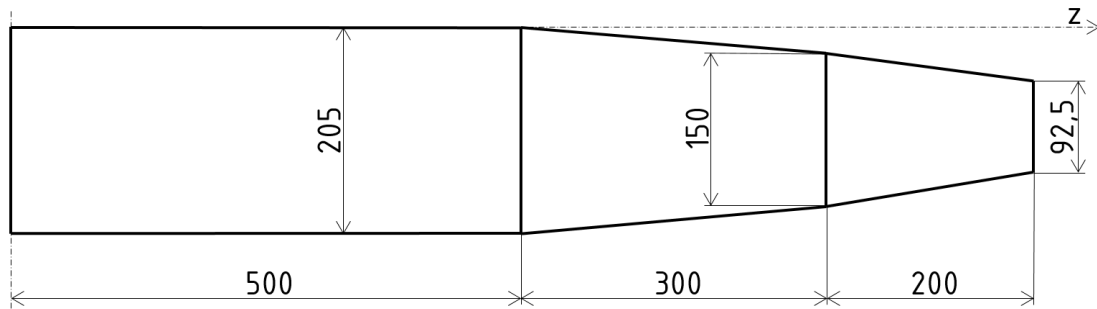
7.3 Výsledná geometrie křídla

Finální tvar rovného křídla lze získat následnou optimalizací nejlepších geometrií z parametrizace. Byly vyzkoušeny další tvary s délkou tětiny střední části $c = 205 \text{ mm}$ a $c = 200 \text{ mm}$.

Nejlepších parametrů bylo dosaženo pro geometrii křídla, která je uvedena na obrázku 7.3. Tento tvar dosahuje klouzavosti až 19,20 a minimálního opadání $0,2675 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Je žádoucí, aby byl větroň stabilní, obzvláště když nemá řízená křídélka. Toho lze docílit pomocí vzepětí koncových částí křídel. Určit správnou velikost vzepětí je složité a překračuje rozsah této práce. Nejlepší metodou navíc zůstává zkoušení různých vzepětí v reálném letu a následné vyhodnocení optimálního kompromisu mezi ovladatelností a stabilitou. Proto bude vzepětí voleno na základě již postavených modelů z kapitoly 3.2 Modely kategorie RES.

Vzepětí bylo zvoleno 10° ve vzdálenosti 500 mm od středu křídla a dalších 12° (tedy 22° od vodorovné roviny) ve vzdálenosti 800 mm od středu křídla. Tímto zásahem se

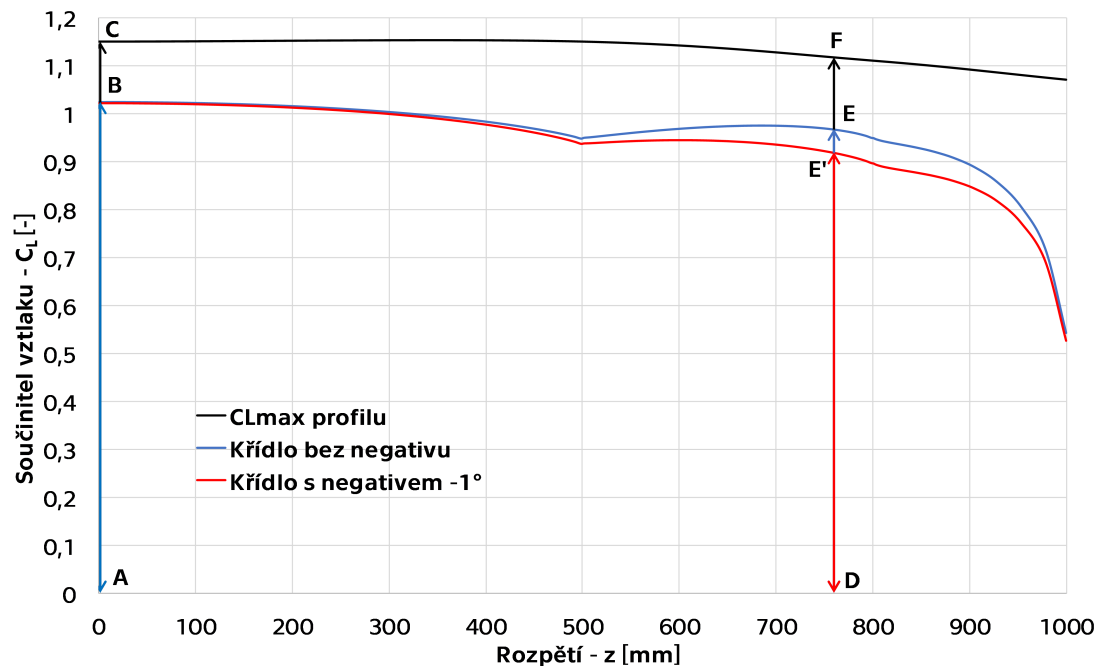


Obrázek 7.3. Nákres poloviny křídla výsledné geometrie bez vzepětí.

zmenší promítnuté rozpětí modelu. Proto bylo křídlo zvětšeno, aby byl co nejvíce využit potenciál letadla v mezích pravidel maximálního rozpětí.

7.3.1 Počátek odtržení proudu na křídle

S ohledem na říditelnost v mezních situacích byl na obrázku 7.4 vynesena graf závislosti C_L a C_{Lmax} na souřadnici z . C_L představuje součinitele vztlaku křídla v daném místě a C_{Lmax} maximální hodnotu součinitele vztlaku profilu, která je v dané části křídla dosažitelná. Sledován bude poměr K_L , který vyjadřuje velikosti úsečky mezi vodorovnou osou a C_{Lmax} ku úsečce od vodorovné osy k C_L křídla. Tam, kde bude tato hodnota minimální, nastává kritické místo.



Obrázek 7.4. Součinitel vztlaku v závislosti na rozpětí – maximální, bez negativu, s negativem pro výslednou geometrii křídla se vzepětím.

Pro zvolené křídlo se vzepětím jsou v grafu na obrázku 7.4 podezřelá dvě místa. Prvním je střed křídla, kde:

$$K_{L0} = \frac{|AC|}{|AB|} = \frac{1,15}{1,024} = 1,123 \quad (7.3)$$

Druhé se nachází ve vzdálenosti $z = 760 \text{ mm}$. Výpočet vypadá následovně:

$$K_{L760} = \frac{|DF|}{|DE|} = \frac{1,117}{0,9967} = 1,121 \quad (7.4)$$

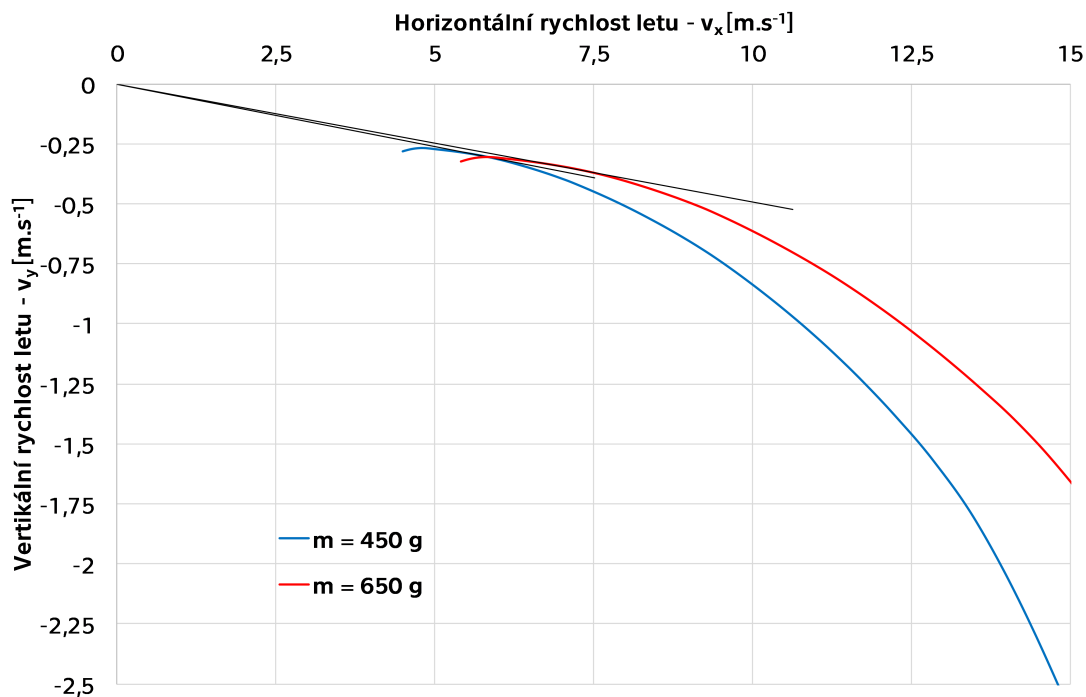
Ve vzdálenosti 760 mm od trupu je hodnota poměru menší než u středu křídla. Vytvořením negativu na žebro mezi druhou a třetí částí každé poloviny křídla lze tomuto kritickému stavu předejít. Velikost natočení je -1° . Při délce daného žebra 150 mm znamená toto natočení zvednutí odtokové hrany o 2,5 mm nahoru. Žebro umístěné na konci obdélníkové části i koncové žebro křídla zůstávají bez negativu. S tímto typem natočení bylo dosaženo nejmenšího zásahu do výkonů větroně.

Pro křídlo s negativem -1° je hodnota K_{L0} (středu křídla $z = 0 \text{ mm}$) stejná jako u křídla bez negativu. Hodnota poměru ve vzdálenosti $z = 760 \text{ mm}$ je vypočtena níže:

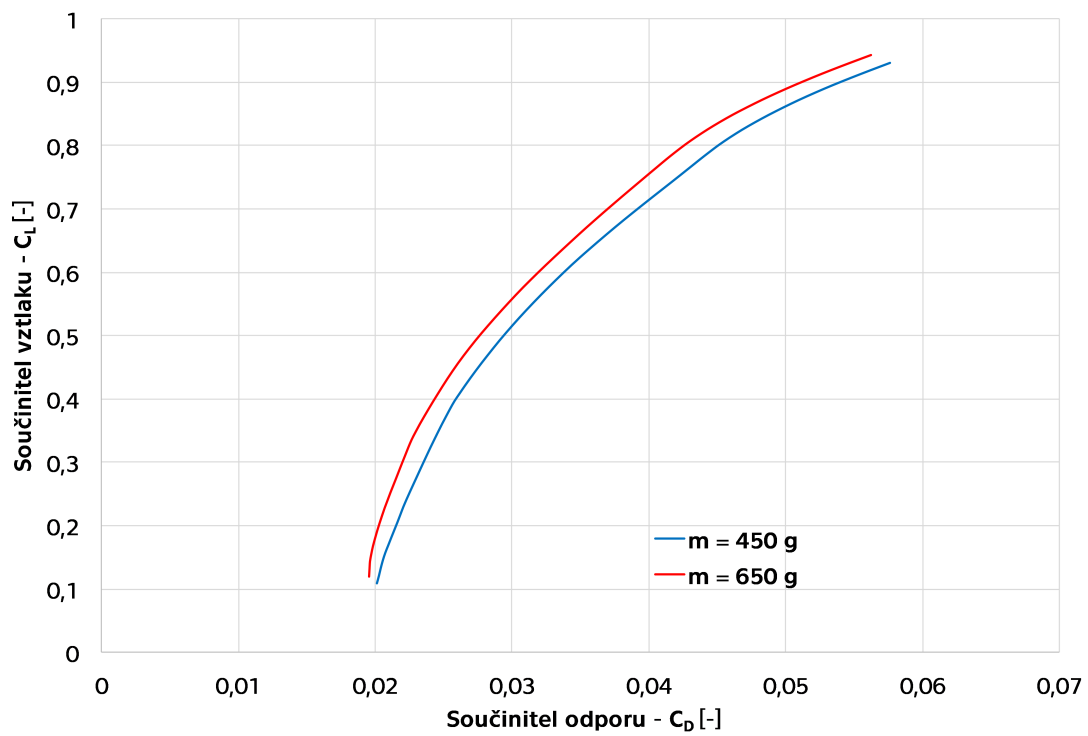
$$K_{L760neg} = \frac{|DF|}{|DE'|} = \frac{1,117}{0,9167} = 1,219 \quad (7.5)$$

7.3.2 Parametry zvoleného křídla

Rychlostní poláry modelu se zvoleným křídlem jsou vidět v grafu na obrázku 7.5. Je zde uvedena jak polára při hmotnosti modelu $m = 450 \text{ g}$, tak i pro celkové zatížení $m = 650 \text{ g}$. Pro lehkou verzi modelu je maximální klouzavost 19,08 a minimální opadání $0,270 \text{ m.s}^{-1}$, pro těžší model je maximální klouzavost vyšší 20,3 a minimální opadání je $0,306 \text{ m.s}^{-1}$. Dále je vykreslen graf polár křídla na obrázku 7.6 pro různé hmotnosti modelu. Vybrané parametry zvoleného křídla se vzepětím a negativem jsou uvedeny v tabulce 7.3.



Obrázek 7.5. Rychlostní poláry modelu s křídlem se vzepětím a negativem pro různé hmotnosti letadla.



Obrázek 7.6. Poláry modelu s křídlem se vzepětím a negativem pro různé hmotnosti letadla.

| | |
|---|-------|
| Profil | BC30 |
| Rozpětí promítnuté [mm] | 1 994 |
| Výška profilu - u kořene [mm] | 12,9 |
| Hloubka křídla - u kořene [mm] | 205 |
| Štíhlost křídla [-] | 11,37 |
| Plocha křídla [dm ²] | 36,4 |
| Plocha křídla promítnutá [dm ²] | 35,88 |

Tabulka 7.3. Parametry křídla navrženého modelu.

Kapitola 8

Návrh dimenzování nosníku křídla

Tato kapitola se věnuje stanovení násobků a rychlostí, ve kterých se letadlo může pohybovat. Následně je proveden návrh dimenzování nosníku křídla. Kompletní pevnostní výpočet křídla je mimo rozsah této bakalářské práce. Při výpočtu byl uvažován pouze ohybový moment od vztlakové síly. Krut byl zanedbán.

8.1 Letová obálka

Letová obálka zobrazuje rozsah povolených rychlostí a provozních násobků letadla. Všechny výpočty pro konstrukci obrátové obálky budou provedeny podle stavebního předpisu EASA CS-22 pro větroně [31].

8.1.1 Stanovení rychlostí pro kladné násobky

Pro výpočet návrhové rychlosti obrátu v_A podle stavebního předpisu EASA CS-22 [31] platí:

$$v_A = v_{S1} \sqrt{n_1} \quad (8.1)$$

Kde v_{S1} je pádová rychlost maximálně zatíženého letadla, která se vypočítá z rovnosti vztlakové a tíhové síly. Pro případ tohoto návrhu se jedná o rychlost $v_{S1} = 5,55 \text{ m.s}^{-1}$ při hmotnosti letadla $m = 650 \text{ g}$. Násobek vychází ze stavebního předpisu [31] $n_1 = +5,3$.

Po dosazení:

$$v_A = 5,55 \sqrt{5,3} = 12,78 \text{ m.s}^{-1} \quad (8.2)$$

Návrhová rychlost v_D může být volena, ale nesmí být menší než:

$$v_D = 18 \sqrt[3]{\left(\frac{W}{S}\right) \left(\frac{1}{C_{Dmin}}\right)} \quad (8.3)$$

Vzorec (8.3) je platný pro větroně kategorie U a vychází v km.h^{-1} . Člen $\frac{W}{S}$ je plošné zatížení v daN.m^{-2} při maximální hmotnosti letadla. C_{Dmin} je nejmenší možný dosažitelný součinitel odporu větroně. Obě dvě hodnoty byly odečteny z grafu v softwaru XFLR. $C_{Dmin} = 0,013$, plocha křídla $S = 35,88 \text{ dm}^2$.

$$v_D = 18 \sqrt[3]{\left(\frac{0,65 \cdot 9,81 \cdot 0,1}{0,3588}\right) \left(\frac{1}{0,013}\right)} = 92,73 \text{ km.h}^{-1} = 25,76 \text{ m.s}^{-1} \quad (8.4)$$

Na základě výpočtu v rovnici (8.4) byla zvolena rychlost $v_D = 29,53 \text{ m.s}^{-1}$, násobek pro tuto rychlost vychází ze stavebního předpisu [31] $n_2 = +4,0$.

8.1.2 Stanovení rychlostí pro záporné násobky

Pro další výpočty je nutné znát pádovou rychlost při letu na zádech. K tomuto výpočtu bude dále zapotřebí minimální součinitel vztlaku křídla. Ten byl odhadnut z maximální hodnoty C_{Lkrmax} a poměru maximálního a minimálního součinitele vztlaku profilu BC30 pro $Re = 60\,000$, což odpovídá průměrné hodnotě Reynoldsova čísla, ve které se křídlo pohybuje při pádové rychlosti $v = 5,55\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

$$C_{Lkrmin} = C_{Lkrmax} \left(\frac{C_{Lmin}}{C_{Lmax}} \right)_{profil} = 1 \left(\frac{0,45}{1,14} \right) = 0,40 \quad (8.5)$$

Pro pádovou rychlost na zádech platí:

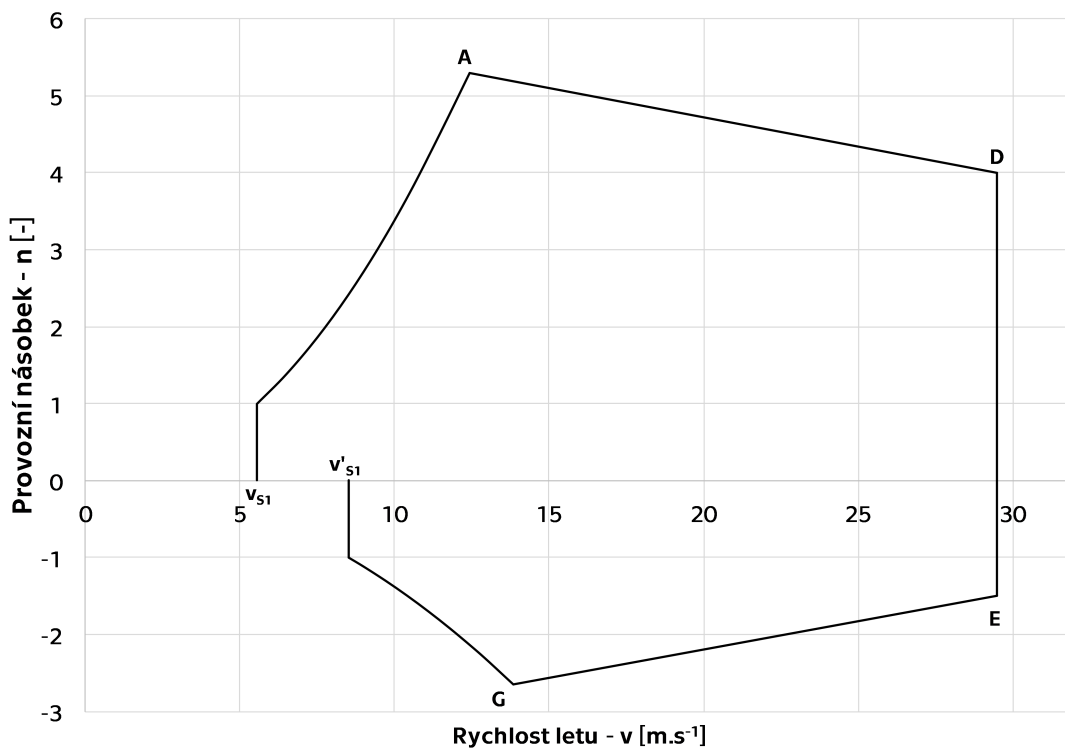
$$v'_{S1} = \sqrt{\frac{2mg}{\rho S C_{Lkrmin}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,650 \cdot 9,81}{1,225 \cdot 0,3588 \cdot 0,4}} = 8,51\text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \quad (8.6)$$

Pro návrhovou rychlost obratu při záporném násobku v_G pak platí:

$$v_G = v'_{S1} \sqrt{n_4} = 8,51 \sqrt{2,65} = 13,85\text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \quad (8.7)$$

Násobek pro rychlost v_G je $n_4 = -2,65$. Rychlost v_D platí i pro let na zádech, použitý násobek se však liší $n_3 = -1,5$, jak plyne ze stavebního předpisu [31].

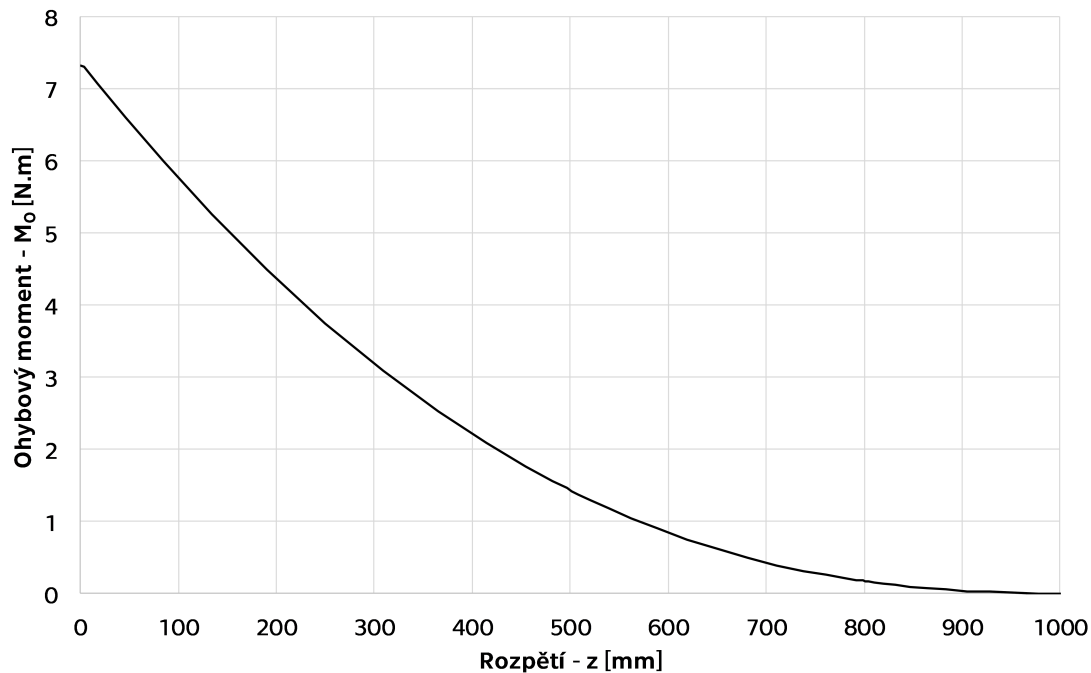
8.1.3 Výsledná obálka



Obrázek 8.1. Obrátová obálka.

8.2 Návrh nosníku

Největší zatížení nosníku nastane při největším násobku n . Jedná se tedy o rychlost $v_A = 12,78\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a násobek $n = +5,3$. Rozložení ohybového momentu po rozpětí při těchto hodnotách získané ze softwaru XFLR je zobrazeno v grafu na obrázku 8.2.



Obrázek 8.2. Rozložení ohybového momentu po rozpětí křídla pro rychlosti letu $v_A = 12,78 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Maximální ohybový moment vzniká uprostřed křídla $M_{omax} = 7,31 \text{ N}\cdot\text{m}$ při hmotnosti letadla $m = 650 \text{ g}$.

Jako hlavní nosník bude použita trubka s vnějším průměrem D a vnitřním průměrem d . Vycházím ze vzorce pro výpočet napětí v ohybu:

$$\sigma_D \geq \frac{M_o}{W_o} \quad (8.8)$$

Hodnota na mezi pevnosti uhlíku vychází ze zkoušek uhlíkových trubek v laboratoři ÚLT $\sigma_M = 900 \text{ MPa}$. Bezpečnost je zvolena $k = 1,5$.

$$\sigma_D = \frac{\sigma_M}{k} = \frac{900}{1,5} = 600 \text{ MPa} \quad (8.9)$$

Pro průřezový model v ohybu W_o trubky platí:

$$W_o = \frac{\pi D^3}{32} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right] \quad (8.10)$$

8.2.1 Obdélníková část křídla

Jako hlavní nosník obdélníkové části křídla, která je dlouhá 1 000 mm, byla zvolena uhlíková trubka s vnějším průměrem $D = 6 \text{ mm}$ a vnitřním průměrem $d = 4 \text{ mm}$. Napětí v ohybu je:

$$\sigma_o = \frac{M_o}{\frac{\pi D^3}{32} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right]} = \frac{7310}{\frac{\pi \cdot 6^3}{32} \left[1 - \left(\frac{4}{6} \right)^4 \right]} = 430 \text{ MPa} \quad (8.11)$$

Trubka 6/4 mm pevnostně vyhovuje.

8.2.2 Koncové části křídla

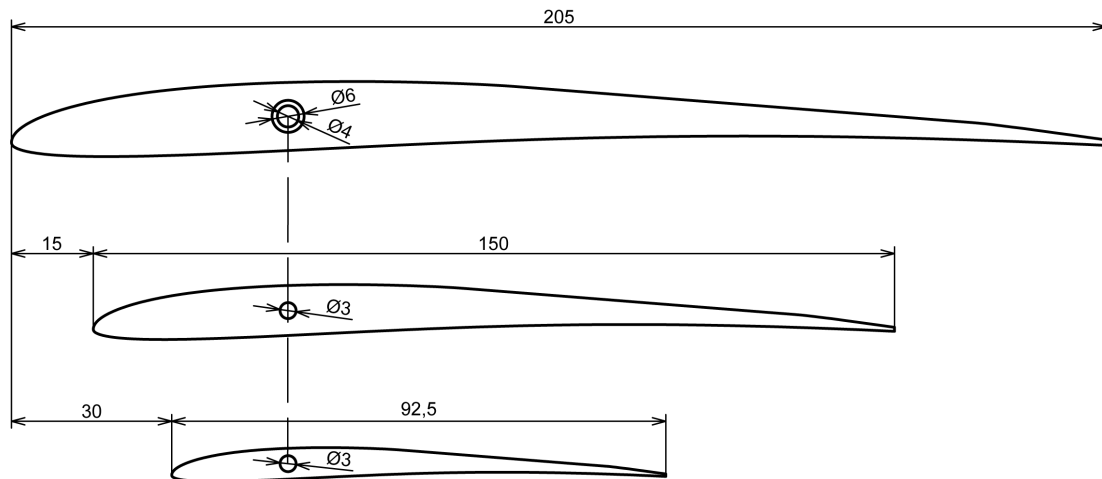
Moment působící na koncové lichoběžníkové části je výrazně menší, než tomu je u středu křídla. Nosník tedy v těchto místech není tolik namáhaný. Navíc se tětíva profilu zkracuje a tím pádem se zmenšuje i výška profilu až na konečných 5,8 mm. Proto je vhodné použít menší průměr trubky.

Maximální moment vznikající v koncových částí je ve vzdálenosti 500 mm od trupu, tedy v místě, kde se napojuje obdélníková část na lichoběžníkové části křídla. Jeho velikost je $M_o = 1,42 \text{ N.m}$. Vzhledem k omezené nabídce uhlíkových trubek s vnějším průměrem menším než 3 mm byla zvolena uhlíková tyčka o průměru $D = 3 \text{ mm}$. Napětí v ohybu pak odpovídá:

$$\sigma_o = \frac{M_o}{\frac{\pi D^3}{32}} = \frac{1420}{\frac{\pi \cdot 3^3}{32}} = 536 \text{ MPa} \quad (8.12)$$

Tyčka o průměru $D = 3 \text{ mm}$ pevnostně vyhovuje.

Na obrázku 8.3 je zobrazeno umístění nosníku v koncových žebrech jednotlivých částí křídla. Žebra jsou vůči sobě posunutá podle výsledné geometrie křídla.



Obrázek 8.3. Nákres koncových žebrek s umístěním nosníku.

Kapitola 9

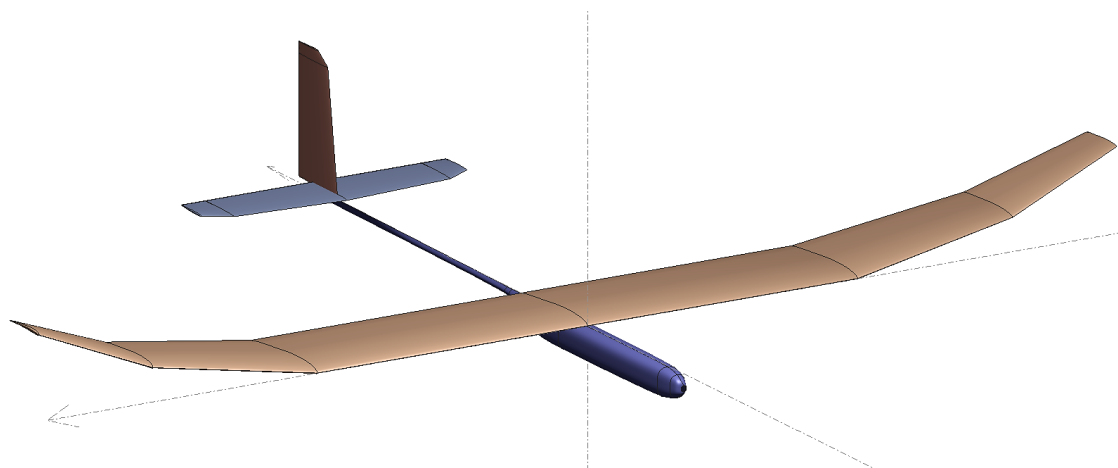
Třípohledový náčrtek a parametry modelu

Celková délka modelu je 1 200 mm. Konstrukce trupu vychází z modelů používaných v kategorii RES. V zadní části trupu je použita uhlíková trubka o průměru 10 mm. Ocasní plochy jsou klasického uspořádání, konstrukce ze 4 mm balsy s odlehčením v podobě otvorů a následným potažením papírem či fólií.

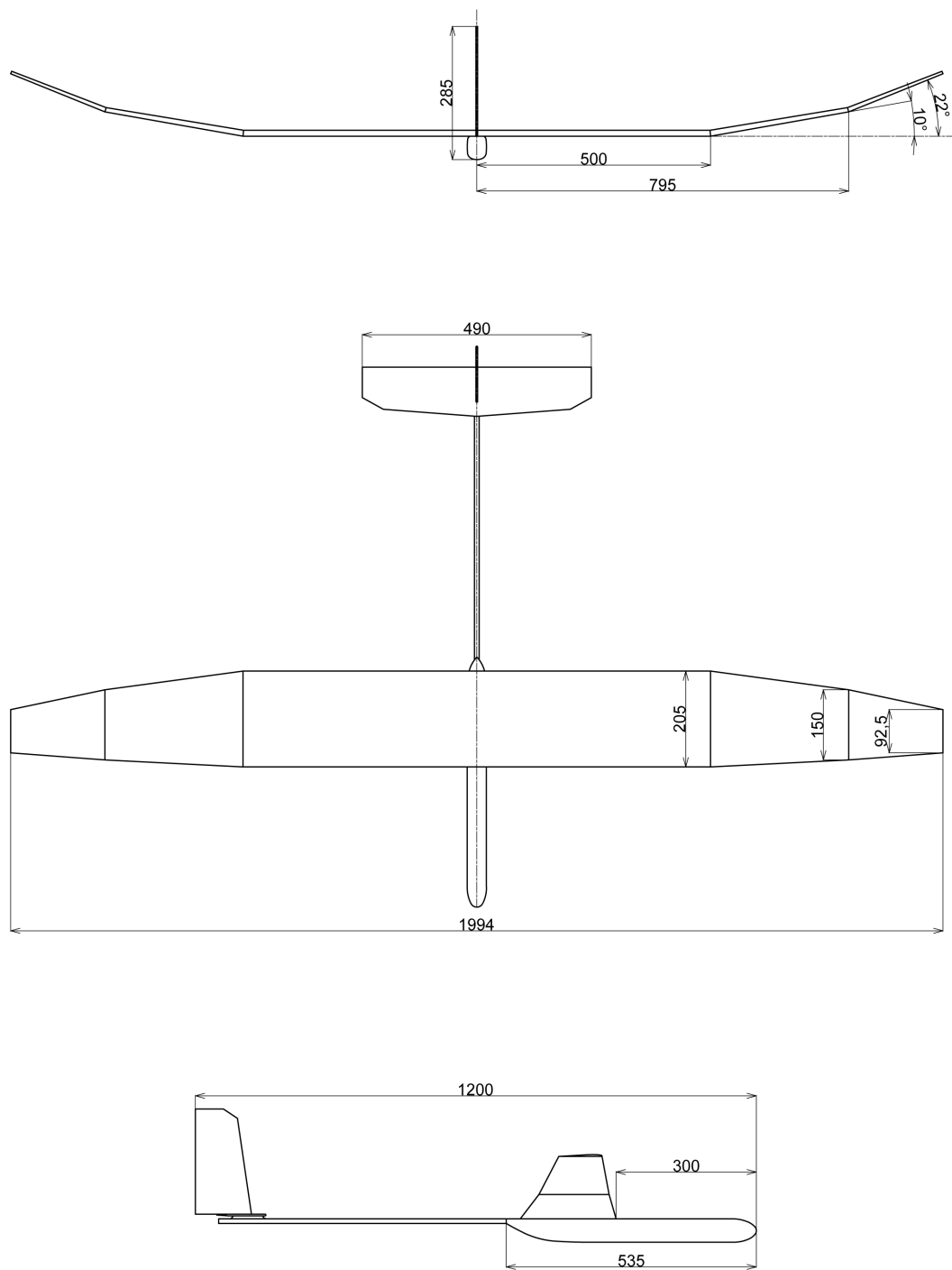
Parametry letadla jsou uvedeny v tabulce 9.1.

| | |
|---|---------------|
| Délka [mm] | 1 200 |
| Rozpětí [mm] | 1 994 |
| Profil | BC30 |
| Výška profilu – u kořene [mm] | 12,9 (6,29 %) |
| Hloubka křídla – u kořene [mm] | 205 |
| Štíhlost křídla [-] | 11,37 |
| Promítnutá plocha křídla [dm ²] | 35,88 |
| Vzepětí [°] | 0 + 10 + 12 |
| Plocha VOP [dm ²] | 4,6 |
| Štíhlost VOP [-] | 5,22 |
| Mohutnost VOP [-] | 0,5 |
| Plocha SOP [dm ²] | 2,3 |
| Mohutnost SOP [-] | 0,26 |
| Předpokládaná hmotnost [g] | 450–650 |
| Předpokládané plošné zatížení [g.dm ⁻²] | 12,5–18,1 |

Tabulka 9.1. Specifikace navrženého modelu.



Obrázek 9.1. 3D model navrženého větroně.



Obrázek 9.2. Třípohledový nákres navrženého větrně.

Kapitola 10

Závěr

Cílem této bakalářské práce byl návrh rádiem řízeného modelu větroně kategorie RES.

Na základě rešeršní části byl vytvořen první prototyp modelu s rovným obdélníkovým křídlem. Ten posloužil pro srovnání a výběr optimálního profilu pro navrhované letadlo. Z 16 porovnávaných variant dopadly nejlépe profily AG27 a BC30, které vykazovaly nejlepší hodnoty minimálního opadání $v_{y_min} = 0,277 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Profil BC30 navíc vykazoval i vyšší maximální klouzavost a byl zvolen jako profil pro navrhované letadlo.

Tvar křídla vycházel z parametrizace, která svůj základ a vstupní parametry opírá o modely již v této soutěžní kategorii létající. S ohledem na říditelnost v mezních situacích a na pádové vlastnosti byla zavržena křídla s délkou tětivy střední části větší než 210 mm. Po optimalizaci výsledků parametrizace bylo zvoleno křídlo s promítnutou plochou $S = 35,88 \text{ dm}^2$, promítnutým rozpětím $L = 1994 \text{ mm}$ a štiřlostí $\lambda = 11,37$. Skládá se ze střední obdélníkové části dlouhé 1 000 mm a délka tětivy žebra je v této části dlouhá 205 mm. Následuje lichoběžníková část s délkou 300 mm a délkou tětivy koncového žebra 150 mm. Koncová část je rovněž lichoběžníková s délkou 200 mm a tětiva koncového žebra na konci křídla měří 92,5 mm.

Po stanovení tvaru křídla byl následně proveden návrh dimenzování nosníku křídla. Pro střední část křídla byla jako hlavní nosník navržena kompozitová uhlíková trubka o vnějším průměru 6 mm a tloušťce stěny 1 mm. Pro koncové části křídla byla navržena uhlíková tyčka o průměru 3 mm.

Konstrukce trupu a ocasních ploch vychází z modelů používaných v soutěžní kategorii RES. Celková délka modelu je 1 200 mm. Ocasní plochy byly navrženy klasického uspořádání.

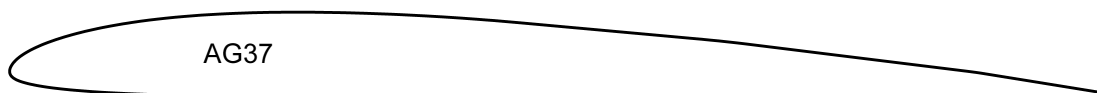
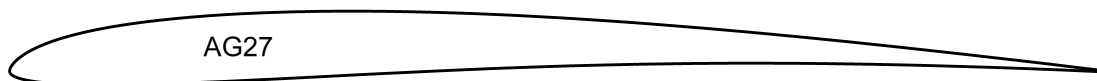
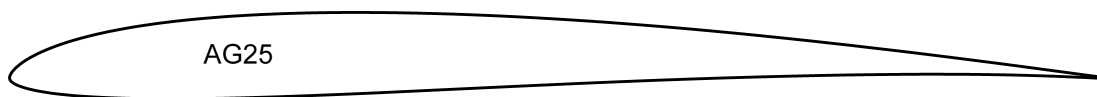
Nakonec byl proveden třípohledový nářres nově navrženého letadla, který lze spolu s parametry najít v předchozí kapitole. Navržené letadlo by mělo dosahovat minimálního opadání $0,28 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a maximální klouzavosti 19.

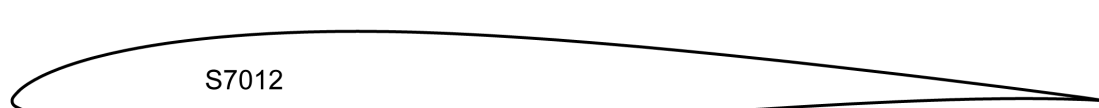
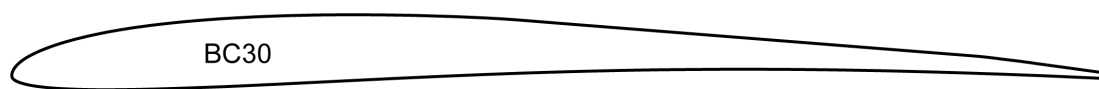
Literatura

- [1] Klasse F3RES Thermik - Segelflugmodelle (Rudder, Elevator, Spoiler). *Modellflugimdaec.de* [online]. 1.1.2017 [cit. 2018-02-12]. Dostupné z: <http://modellflugimdaec.de/images/buko/bemod/pdf/t3/t36/t365/36-534.pdf>
- [2] SCHWARTZ, Frank. *R.E.S. - Kleine Thermiksegler mit großer Leistung*. Německo: Verlag für Technik und Handwerk neue Medien, 2014. ISBN 978-3-88180-463-9.
- [3] RES-olution V2. *HyperFlight.co.uk* [online]. [cit. 2018-02-08]. Dostupné z: www.hyperflight.co.uk/products.asp?code=RESOLUTION-V2&name=res-olution-v2
- [4] RES-olution V2 (fotka). *HyperFlight.co.uk* [online]. [cit. 2018-02-12]. Dostupné z: <https://www.hyperflight.co.uk/getpic.asp?size=o&code=RESOLUTION%2DV2>
- [5] AndREaS (fotka). *ZELLER MODELLBAU e.U.* [online]. [cit. 2018-02-24]. Dostupné z: https://zeller-modellbau.com/media/catalog/product/cache/1/image/500x500/9df78eab33525d08d6e5fb8d27136e95/w/r/wr0010_b.0.jpg
- [6] AndREaS KIT 1990 mm HÖLLEIN. *ZELLER MODELLBAU e.U.* [online]. [cit. 2018-02-24]. Dostupné z: <https://zeller-modellbau.com/flugzeuge/segler/andreas-kit-1990-mm-hoellein.html>
- [7] AndREaS - F3-RES. *HyperFlight.co.uk* [online]. [cit. 2018-02-24]. Dostupné z: <https://www.hyperflight.co.uk/products.asp?code=ANDREAS&name=andreas-f3-res>
- [8] Picares EVO (fotka). *HyperFlight.co.uk* [online]. [cit. 2018-02-24]. Dostupné z: <https://www.hyperflight.co.uk/getpic.asp?id=3444&size=o>
- [9] Samba R.E.S. Standard (výkres). *HyperFlight.co.uk* [online]. [cit. 2018-02-15]. Dostupné z: <https://www.hyperflight.co.uk/getfile.asp?code=SAMBA%2DRES%2D2&code2=3>
- [10] PURES V2 - Motivation, Daten, Konstruktionsbeschreibung, Bilder. *Pures-v2.blogspot.cz* [online]. [cit. 2018-02-17]. Dostupné z: <http://pures-v2.blogspot.cz/2012/12/pures-v2-motivation-daten.html>
- [11] PURES V2 - 2 Meter RES Segelflugmodell. *SETA Modelltechnik* [online]. [cit. 2018-02-17]. Dostupné z: <http://seta-tech.de/themes/kategorie/detail.php?artikelid=9>
- [12] PURES V2 (výkres). *Pures-v2.blogspot.cz* [online]. [cit. 2018-02-17]. Dostupné z: <http://1.bp.blogspot.com/-M8QmhLDdgn8/UJ7PRP2VdYI/AAAAAAAAAFDM/WT1PjDOYGYc/s1600/3-Seiten-Ansicht.jpg>
- [13] Slite 2M RES. *SETA Modelltechnik* [online]. [cit. 2018-02-17]. Dostupné z: <http://seta-tech.de/themes/kategorie/detail.php?artikelid=19&kategorieid=2&source=1&refertype=8>
- [14] Slite 2M RES (fotka). *RC-Network.de* [online]. [cit. 2018-02-18]. Dostupné z: <http://www.rc-network.de/forum/attachment.php?attachmentid=1496672&d=1479430487>

- [15] Fresh F3-RES. *HyperFlight.co.uk* [online]. [cit. 2018-02-18]. Dostupné z: <https://www.hyperflight.co.uk/products.asp?code=FRESH>
- [16] FRESH2015 (výkres). *RC-Network.de* [online]. [cit. 2018-02-18]. Dostupné z: <http://www.rc-network.de/forum/attachment.php?attachmentid=1455168&d=1479430100>
- [17] MADRES-profil (fotka). *RC-Network.de* [online]. [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: <http://www.rc-network.de/forum/attachment.php?attachmentid=1579763&d=1479430702>
- [18] MadRES (fotka). *HyperFlight.co.uk* [online]. [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: <https://www.hyperflight.co.uk/getpic.asp?id=3594&size=o>
- [19] MADRES (manuál): Fun-RES model, F3B-R.E.S Competition model. *HyperFlight.co.uk* [online]. [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: <https://www.hyperflight.co.uk/getfile.asp?code=MAD%2DRES&code2=1>
- [20] MadRES. *HyperFlight.co.uk* [online]. [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: <https://www.hyperflight.co.uk/products.asp?code=MAD-RES&name=madres>
- [21] Noch ein MAD-RES. *RC-Network.de* [online]. [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: <http://www.rc-network.de/forum/showthread.php/559037-Informationen-MAD-RES/page3>
- [22] X-RES. *HyperFlight.co.uk* [online]. [cit. 2018-02-23]. Dostupné z: <https://www.hyperflight.co.uk/products.asp?code=X-RES&name=x-res>
- [23] X-res: R.E.S. Modell (manuál) [online]. [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: <https://www.hyperflight.co.uk/getfile.asp?code=X%2DRES&code2=1>
- [24] X-RES (fotka). *HyperFlight.co.uk* [online]. [cit. 2018-02-22]. Dostupné z: <https://www.hyperflight.co.uk/getpic.asp?id=3009&size=o>
- [25] BABA-JAGA-COMPETITION KIT 2000 mm SCHUSTER. *ZELLER MODELL-BAU e.U.* [online]. [cit. 2018-02-24]. Dostupné z: <https://zeller-modellbau.com/baba-jaga-competition-kit-2000-mm-schuster.html>
- [26] Baba-Jaga (fotka). *Modellbauservice.com* [online]. [cit. 2018-02-24]. Dostupné z: <http://www.modellbauservice.com/schuster/userfiles/images/Baba1.jpg>
- [27] Baba-Jaga Competition (fotka). *Modellbauservice.com* [online]. [cit. 2018-02-24]. Dostupné z: <http://www.modellbauservice.com/schuster/userfiles/images/BBC3.jpg>
- [28] Resoholic-1-3 (fotka). *AR-flugmodelle.at* [online]. [cit. 2018-02-25]. Dostupné z: <https://www.ar-flugmodelle.at/wp-content/uploads/2015/07/Resoholic-1-3.jpg>
- [29] RESoholic: Thermikrausch inbegriffen!. *AR-flugmodelle.at* [online]. [cit. 2018-02-25]. Dostupné z: <https://www.ar-flugmodelle.at/resoholic/>
- [30] MUSIL, Miroslav. *Aerodynamika moderních leteckých modelů*. Praha: Naše vojsko, 1978.
- [31] Certification Specifications for Sailplanes. *Easa.europa.eu* [online]. 5.3.2009 [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/Consolidated%20version%20CS-22%20Amdt%202.pdf>

Příloha A
Porovnávané profily





Příloha B

Souřadnice profilu BC30

| X | Y | X | Y | X | Y | X | Y |
|---------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|----------|
| 1 | 0,0025 | 0,43664 | 0,05272 | 0 | -0,00009 | 0,47359 | 0,00268 |
| 0,99416 | 0,00332 | 0,42154 | 0,05343 | 0,00039 | -0,0017 | 0,48902 | 0,00317 |
| 0,98201 | 0,00498 | 0,40637 | 0,05405 | 0,00147 | -0,00314 | 0,50446 | 0,00363 |
| 0,96772 | 0,00696 | 0,39114 | 0,05457 | 0,00315 | -0,00434 | 0,51988 | 0,00405 |
| 0,95279 | 0,009 | 0,3759 | 0,055 | 0,00533 | -0,00542 | 0,53529 | 0,00443 |
| 0,9382 | 0,011 | 0,36067 | 0,05535 | 0,00813 | -0,00647 | 0,55073 | 0,00477 |
| 0,92438 | 0,01293 | 0,34543 | 0,0556 | 0,0118 | -0,00753 | 0,56617 | 0,00507 |
| 0,91046 | 0,01462 | 0,33023 | 0,05576 | 0,01679 | -0,00863 | 0,58158 | 0,00533 |
| 0,89664 | 0,01637 | 0,315 | 0,05582 | 0,02379 | -0,00976 | 0,597 | 0,00554 |
| 0,88305 | 0,01784 | 0,29978 | 0,05579 | 0,03346 | -0,01085 | 0,61242 | 0,00572 |
| 0,86863 | 0,019 | 0,28464 | 0,05565 | 0,04555 | -0,01174 | 0,62785 | 0,00584 |
| 0,85359 | 0,02018 | 0,26947 | 0,0554 | 0,05916 | -0,01232 | 0,6433 | 0,00594 |
| 0,83824 | 0,02139 | 0,25432 | 0,05504 | 0,0735 | -0,01264 | 0,65872 | 0,00599 |
| 0,82276 | 0,02261 | 0,2392 | 0,05457 | 0,08822 | -0,01271 | 0,67412 | 0,006 |
| 0,80725 | 0,02384 | 0,22414 | 0,05398 | 0,10316 | -0,01261 | 0,68954 | 0,00596 |
| 0,79173 | 0,02506 | 0,20917 | 0,05323 | 0,11827 | -0,01237 | 0,70498 | 0,00589 |
| 0,77621 | 0,02629 | 0,19417 | 0,05234 | 0,1335 | -0,01202 | 0,7204 | 0,00577 |
| 0,76068 | 0,02752 | 0,17926 | 0,05131 | 0,14875 | -0,01159 | 0,73582 | 0,00561 |
| 0,74516 | 0,02874 | 0,16447 | 0,0501 | 0,16406 | -0,01107 | 0,75126 | 0,00541 |
| 0,72963 | 0,02997 | 0,14974 | 0,04871 | 0,17944 | -0,01049 | 0,76667 | 0,00517 |
| 0,71411 | 0,03119 | 0,13513 | 0,04711 | 0,19483 | -0,00987 | 0,78214 | 0,00489 |
| 0,69858 | 0,03242 | 0,12068 | 0,04529 | 0,21025 | -0,0092 | 0,79755 | 0,00457 |
| 0,68305 | 0,03365 | 0,10641 | 0,04322 | 0,22573 | -0,00849 | 0,81302 | 0,00422 |
| 0,66751 | 0,03487 | 0,09235 | 0,04088 | 0,2412 | -0,00777 | 0,82846 | 0,00384 |
| 0,65198 | 0,0361 | 0,07859 | 0,03823 | 0,25668 | -0,00702 | 0,84392 | 0,00342 |
| 0,63645 | 0,03733 | 0,06524 | 0,03526 | 0,27221 | -0,00625 | 0,85938 | 0,00297 |
| 0,62092 | 0,03855 | 0,05241 | 0,03194 | 0,28775 | -0,00548 | 0,87484 | 0,00249 |
| 0,6054 | 0,03978 | 0,04052 | 0,02832 | 0,30329 | -0,00471 | 0,89032 | 0,00198 |
| 0,58987 | 0,041 | 0,02997 | 0,02451 | 0,31883 | -0,00395 | 0,90577 | 0,00145 |
| 0,57435 | 0,04223 | 0,02137 | 0,0208 | 0,33437 | -0,00319 | 0,92123 | 0,00088 |
| 0,55882 | 0,04345 | 0,01488 | 0,01742 | 0,34986 | -0,00244 | 0,93665 | 0,00028 |
| 0,54329 | 0,04468 | 0,01018 | 0,01445 | 0,36534 | -0,00173 | 0,95205 | -0,00035 |
| 0,52777 | 0,04591 | 0,00679 | 0,01183 | 0,38084 | -0,00102 | 0,96726 | -0,00101 |
| 0,51226 | 0,04713 | 0,00433 | 0,00945 | 0,39633 | -0,00034 | 0,98169 | -0,00167 |
| 0,49678 | 0,04835 | 0,00256 | 0,00726 | 0,41182 | 0,00033 | 0,99396 | -0,00224 |
| 0,48139 | 0,04956 | 0,0013 | 0,00524 | 0,42727 | 0,00096 | 1 | -0,0025 |
| 0,46624 | 0,05077 | 0,00049 | 0,00334 | 0,44272 | 0,00157 | | |
| 0,45143 | 0,05186 | 0,00008 | 0,00157 | 0,45818 | 0,00214 | | |