

K napsání tohoto článku mne vyprovokovaly 3 věci:

1. V první řadě zvědavost, jak že to s těmi profily vlastně je. Protože jsem si před časem z Internetu stáhl program xfoil verze 6.94, dostal se mi do rukou mocný nástroj, kterému sice příliš nerozumím, což mi ale nezabránilo v tom, abych ho použil.
2. Diskuse s Jirkou Veselovským, který "400" (nyní vlastně již RCEJ) úspěšně létá. Zde se dopředu omlouvám všem pilotům "400", kterým vlastně lezu do zelí, aniž bych si to na vlastní ruce a hlavu zkusil.
3. Článek pana Lněničky na www.rc-etd.com o profilech vhodných pro elektry. Upozorňuji, že se tam nikde nemluví právě o "400" a proto toto není polemika s panem Lněničkou (pokud to tak vyzní, nebylo to záměrem, na rozdíl od pana Lněničky nejsem aerodynamik).

Jaký profil na "400"

Teorie

Nejprve trocha (hodně) zjednodušené "teorie".

Na model v klouzavém letu působí v podstatě 2 síly - tíha (hmotnost) a síla aerodynamická. Aerodynamickou sílu lze rozložit na vztlak a odpor. Pokud se zanedbá, že model letí k zemi pod nějakým úhlem (pro malé úhly to jde), jde rychlost modelu spočítat ze vztahu

$$v_x = \sqrt{(2 \cdot m \cdot g) / (S \cdot \rho \cdot c_y)} \quad (1)$$

Klesavost

$$v_y = v_x \cdot c_x / c_y \quad (2)$$

Klouzavost

$$\epsilon = c_y / c_x = v_x / v_y \quad (3)$$

kde

m	hmotnost modelu v kg
g	tíhové zrychlení v m/s^2 (=10)
S	plocha v m^2
ρ	hustota vzduchu (=1.2)
c_y	součinitel vztlaku
c_x	součinitel odporu

Důležité z toho je, že rychlost modelu je nepřímo úměrná odmocnině ze součinitele vztlaku. V praxi to znamená, že pokud model (řekněme "400") letí normálně (c_y okolo 1) v kluzu rychlostí asi 6 m/s, při poklesu součinitele vztlaku na 0.25 zrychlí na dvojnásobnou rychlost, tj 12 m/s.

Závislost c_y a c_x se nazývá polára modelu, závislost v_x a v_y potom rychlostní polára.

Vztlak na modelu vyvozuje křídlo. Na odporu se podílí i trup a ostatní součásti, které se pouze vezou. Odpor má v podstatě tři složky

$$c_x = c_{xp} + c_{xi} + c_{xost} \quad (4)$$

- profilový odpor: obtékající vzduch na náběžné hraně rozděljuje a na odtokové zase spojuje. Změny rychlostí a směrů proudění a také tření vzduchu o povrch křídla způsobuje určitou ztrátu, která se vyjadřuje součinitelem profilového odporu c_{xp} . Závislost c_y a c_{xp} se nazývá polára profilu.

- indukovaný odpor: nad křídlem je podtlak, pod křídlem přetlak. Na konci křídla se proto vzduch snaží "přelézt" zesponu nahoru, což způsobuje vír a ztrátu, která závisí na štíhlosti křídla (poměru rozpětí ku hloubce), součiniteli vztlaku a také geometrii křídla. V tomto dokumentu je uvažováno se vztahem

$$c_{xi} = c_y^2 / (\pi * \lambda) * 1.06 \quad (5)$$

kde

π 3.14159

λ štíhlost křídla (rozpětí na druhou děleno plochou)

- ostatní odpor c_{xost} : odpor trubu, ocasních ploch, vrtule, apod; uvažováno s konstantou

Poslední věcí, kterou je nutné zmínit, je závislost obtékání (nejen) profilu na Reynoldsově čísle. Bez dalšího vysvětlování, Re číslo se spočítá ze vztahu

$$Re = 69\,000 * v_x * b$$

kde

b hloubka křídla v m

Povšimněte si prosím, že Re je úměrné rychlosti a tudíž nepřímo úměrné odmocnině ze součinitele vztlaku.

Pro výpočet polár profilů byl použit program xfoil verze 6.94 Marka Drelly s následujícími parametry

$N_{crit} = 4$

Tato konstanta charakterizuje úroveň turbulence při obtékání profilu. Já se domnívám (a nemám to ničím podpořené), že takto zvolená hodnota odpovídá drsnosti papírového potahu.

$type = 2$

Toto je typ výpočtu, kde se Re mění nepřímo úměrně odmocnině z c_y , tj. jako ve skutečnosti u modelu. Proto jedna polára zahrne všechny letové režimy.

Model

Typový model má následující parametry

- rozpětí 1700 mm

- plocha 30 dm²

- hmotnost 500 g

- návrhové $Re=60\,000$ při $c_y=1$

- $c_{xost} = 0.017$

Zkoumané profily

Pro jednoduchost výpočtů jsem použil 4-místnou řadu NACA, která je definována geometricky rovnicí střední křivky a rovnicí symetrického profilu, který se na střední křivku nabalí. Jde o profily zřejmě již překonané (jsou z 20. let 20. století), ale já je mám "rád". Navíc na nich lze snadno studovat vliv parametrů (pokud to někoho zajímá a umí anglicky, viz NACA Report No. 460, kde jsou uvedeny i rovnice).

Výsledky níže jsou získané pro různá prohnutí střední křivky a různé tloušťky profilu.

NACA XXXX

1. číslice - max. prohnutí, použito 1, 2, 3 a 4%
2. číslice - poloha max. prohnutí (všude 4, tj. 40% hloubky)
- 3 a 4. číslice - tloušťka, poloha max. tloušťky vždy ve 30% hloubky, použito 6, 8, 10 a 12%

Dále jsem spočítal rychlostní poláry pro následující profily:

Profil	Tloušťka	Poloha	Prohnutí	Poloha
S3021	9.47	29.6	2.92	38.3
S4083	8.00	24.7	3.50	36.0
E387	9.07	30.6	3.78	40.2
E178	8.70	32.2	2.78	39.1
E205	10.48	29.8	2.98	36.5
RG14	8.47	30.2	1.60	36.4
MH32	8.71	30	2.37	42.7
MH30	7.84	29.7	1.71	44.1
AG25	7.6	24.7	2.4	45.4

Povšimněte si, že všechny profily mají max. tloušťku přibližně ve 30% hloubky a maximální prohnutí přibližně ve 40% hloubky.

Na rychlostních polárách modelu se všemi profily mě zajímaly následující 3 body:

- nejmenší klesavost modelu, která je důležitá pro dobu letu
- největší klouzavost modelu, která je důležitá pro motorový let
- klouzavost a klesavost na rychlosti, zvolil jsem rychlost 12 m/s, tj. asi dvojnásobek normální rychlosti.

Upozornění:

Obrysy profilů byly použity teoretické, ve skutečnosti bude všechno jinak (tlustá odtokovka, prověšený potah, zlomy na potahu vlivem lišt, apod.) Proto je nutné brát výsledky s rezervou.

Výsledky

Výsledky jsou uvedené v následujících třech tabulkách.

Nejmenší klesavost modelu

	klouzavost	rychlost	klesavost
		m/s	m/s
S3021	13.33	5.32	-0.40
S4083	12.84	4.94	-0.38
E387	13.24	5.08	-0.38
E178	13.86	5.59	-0.40
E205	13.10	5.23	-0.40
RG14	13.38	5.92	-0.44
MH32	12.45	5.11	-0.41
MH30	13.20	5.85	-0.44
AG25	13.51	5.48	-0.41
NACA 1406	11.75	6.53	-0.56
NACA 1408	11.91	5.95	-0.50

NACA 1410	12.62	5.93	-0.47
NACA 1412	12.75	5.77	-0.45
NACA 2406	14.10	6.64	-0.47
NACA 2408	13.76	6.03	-0.44
NACA 2410	13.55	5.71	-0.42
NACA 2412	13.16	5.48	-0.42
NACA 3406	14.55	5.97	-0.41
NACA 3408	13.96	5.54	-0.40
NACA 3410	13.50	5.30	-0.39
NACA 3412	13.08	5.18	-0.40
NACA 4406	14.35	5.48	-0.38
NACA 4408	13.66	5.16	-0.38
NACA 4410	13.07	4.98	-0.38
NACA 4412	12.63	4.93	-0.39

Největší klouzavost modelu

	klouzavost	rychlost	klesavost
		m/s	m/s
S3021	14.02	5.93	-0.42
S4083	14.10	6.14	-0.44
E387	13.83	5.97	-0.43
E178	13.93	5.72	-0.41
E205	13.62	5.94	-0.44
RG14	13.84	6.39	-0.46
MH32	14.17	6.25	-0.44
MH30	13.92	6.54	-0.47
AG25	14.27	6.32	-0.44
NACA 1406	12.71	7.61	-0.60
NACA 1408	13.19	6.91	-0.52
NACA 1410	13.39	6.60	-0.49
NACA 1412	13.36	6.34	-0.47
NACA 2406	14.10	6.64	-0.47
NACA 2408	14.11	6.37	-0.45
NACA 2410	13.94	6.15	-0.44
NACA 2412	13.70	6.14	-0.45
NACA 3406	14.56	6.15	-0.42
NACA 3408	14.32	5.95	-0.42
NACA 3410	14.06	5.96	-0.42
NACA 3412	13.78	5.98	-0.43
NACA 4406	14.57	5.97	-0.41
NACA 4408	14.33	5.98	-0.42
NACA 4410	14.05	6.00	-0.43
NACA 4412	13.77	6.02	-0.44

Na rychlosti

	klouzavost	rychlost	klesavost
		m/s	m/s
S3021	6.94	12.00	-1.73
S4083	6.46	12.00	-1.86
E387	6.39	12.00	-1.88

E178	6.97	12.00	-1.71
E205	6.81	12.00	-1.75
RG14	6.97	12.00	-1.72
MH32	7.00	12.00	-1.71
MH30	7.12	12.00	-1.69
AG25	7.06	12.00	-1.70
NACA 1406	7.27	12.00	-1.65
NACA 1408	7.13	12.00	-1.68
NACA 1410	6.93	12.00	-1.73
NACA 1412	6.73	12.00	-1.78
NACA 2406	7.22	12.00	-1.66
NACA 2408	7.09	12.00	-1.69
NACA 2410	6.93	12.00	-1.73
NACA 2412	6.73	12.00	-1.78
NACA 3406	6.70	12.00	-1.79
NACA 3408	6.63	12.00	-1.81
NACA 3410	6.53	12.00	-1.84
NACA 3412	6.42	12.00	-1.87
NACA 4406	6.20	12.00	-1.93
NACA 4408	6.22	12.00	-1.93
NACA 4410	6.18	12.00	-1.94
NACA 4412	6.11	12.00	-1.96

(Mé) Závěry

- rychlosti max. klouzavosti a min. klesavosti jsou blízko u sebe, takže v motorovém letu by měl model letět přibližně stejnou rychlostí jako v kluzu
- rozdíly mezi jednotlivými profily jsou dost malé na to, aby se dalo prohlásit, že na profilu až tak moc nezáleží
- pokud by z toho mělo být nějaké poučení, domnívám se, že profil pro "zkoumaný" model by měl mít prohnutí 2-3% a tloušťku 8-10%
- přesto mi to nedá, a jdu si pro "přes ústa" - který profil vyhrál? Když přiřadím klesavosti na rychlosti váhu 40%, a klesavostem na max. klouzavosti a na min. klesavosti váhy po 30%, dostanu následující pořadí:

E178	100.00%
AG25	99.09%
S3021	98.83%
MH32	98.60%
NACA 2408	98.30%
NACA 2406	97.99%
MH30	97.76%
NACA 2410	97.58%
E205	97.37%
RG14	96.76%
NACA 3406	96.06%
NACA 3408	95.57%
NACA 2412	95.27%
NACA 1408	94.79%
NACA 3410	94.69%
NACA 1410	94.59%

NACA 1412	93.83%
S4083	93.64%
E387	93.17%
NACA 3412	92.98%
NACA 1406	91.96%
NACA 4406	91.87%
NACA 4408	91.60%
NACA 4410	90.97%
NACA 4412	89.74%

Na úplný závěr bych chtěl znovu upozornit, že profil na modelu bude s největší pravděpodobností úplně jiný než teoretický, a že na profilu se zdá opravdu záležet poměrně málo - v uvedeném příkladu je rozdíl mezi "nejlepším a nejhorším" při zvoleném kritériu 10% a to je vzhledem ke všem nejistotám ve výpočtům a některým ne zcela korektním předpokladům rozdíl malý.

Jan Kubica

jan.kubica@tiscali.cz

7.2.07