



Domantas BRUČAS

PROPELERIAI

Projekto kodas
VP1-2.2-ŠMM 07-K-01-023

Studijų programų atnaujinimas
pagal ES reikalavimus, gerinant
studijų kokybę ir taikant
inovatyvius studijų metodus

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Domantas BRUČAS

PROPELERIAI

Mokomoji knyga



Vilnius „Technika“ 2012

D. Bručas. Propeleriai: mokomoji knyga. Vilnius: Technika, 2012, 92 p.
[3,99 aut. l. 2012 09 25]

Knygoje nagrinėjami orlaivių propeleriai, propelerių forma, teoriniai propelerių darbo bei konstravimo ir parinkimo aspektai.

Mokomoji knyga skirta aviacinės mechanikos, orlaivių pilotavimo, skrydžių valdymo ir kitų specialybių studentams, studijuojantiems orlaivių propelerius.

Leidinį rekomendavo VGTU Antano Gustaičio aviacijos instituto studijų komitetas

Recenzavo: Laurynas Naujokaitis, Vilniaus Gedimino technikos universitetas

prof. habil. dr. Antanas Žiliukas, Kauno technologijos universitetas

Leidinyt parengtas ir išleistas už Europos struktūrinių fondų lėšas, jomis finansuojant VGTU Transporto inžinerijos, Biomechanikos ir Aviacinės mechanikos inžinerijos projektą „Studijų programų atnaujinimas pagal ES reikalavimus, gerinant studijų kokybę ir taikant inovatyvius studijų metodus“ pagal Lietuvos 2007–2013 m. Žmogiškųjų išteklių veiksmų programos 2 prioriteto „Mokymasis visą gyvenimą“ VP1-2.2-ŠMM-07-K priemonę „Studijų kokybės gerinimas, tarptautiškumo didinimas“. Projekto kodas Nr. VP1-2.2-ŠMM 07-K-01-023, finansavimo ir administravimo sutartis Nr. VP1-2.2-ŠMM-07-K-01-023.

VGTU leidyklos TECHNIKA 1389-S mokomosios
metodinės literatūros knyga

<http://leidykla.vgtu.lt>

Redaktorė *Jūratė Balčiūnienė*

Maketuotoja *Birutė Bilotienė*

eISBN 978-609-457-286-9

doi:10.3846/1389-S

© Domantas Bručas, 2012

© Vilniaus Gedimino technikos universitetas, 2012

TURINYS

Pratarmė	5
1. Propeleris	6
1.1. Propelerio geometrija	6
1.2. Informacija apie <i>McCauley</i> tipo propelerį	9
1.3. Propelerio darbas ir matmenų analizė	12
2. Momentų teorija	17
2.1. Realus pavyzdys	17
2.2. Trauka ir slėgis	19
2.3. Idealus efektyvumas	20
2.4. Efektyvumas ir galia	21
2.5. Slystančio srauto rotacija ir sukimo momentas	22
3. Menčių elementų teorija	26
3.1. Fizinis paveikslas	26
3.2. Reliatyvus judantis oras ir dinaminis slėgis	26
3.3. Pavienis plotas	27
3.4. Aerodinaminiai koeficientai	27
3.5. Menčių elementų traukos ir galios koeficientų lygybė	28
4. Jungtinė momento ir menčių elementų teorija	32
4.1. Realus paveikslas	32
4.2. Matematinis sprendimas	33
4.3. Statinė trauka	36
4.4. Klaidos ir nesutapimai	37
4.5. Propelerio poliarė	41
5. Propelių rūšys	43
5.1. Pastovaus žingsnio propeleris	43
5.2. Fiksuoto žingsnio propeleris	43
5.3. Kintamo žingsnio propeleris	44
5.4. Nekintančių sūkių propeleris	44
5.5. Įvairios propelerio padėtys	46
5.6. Propelių kūrimo tendencijos	46
6. Bendri propelių grafikai	48
6.1. Mentės aktyvumo koeficientas	49

6.2. Galios keitimo koeficientas X	50
6.3. SDEF	51
7. Propelerio parinkimas	53
8. Naujo propelerio kūrimas	55
8.1. Santykinis greitis ir jo kryptis	56
8.2. Atakos kampas	57
8.3. Mažo ir didelio žingsnio propeleriai	58
9. Propelerių traukos ir sukimosi momento skaičiavimai	60
9.1. Propelerio parametrai	63
9.2. Propelerio efektyvumas.....	65
9.2.1. Propelerio efektyvumo apibrėžimas.....	65
9.2.2. Žingsnio ir propelerio poslinkio koeficiento poveikis	66
10. Propelerio analizė.....	68
11. Sūkurių teorija.....	78
Išvada	91
Literatūra.....	92

PRATARMĖ

Šioje knygoje smulkiai nagrinėjamas propeleris. Supažindinama su propelerio geometrijos, dydžio bei formos ypatybėmis ir svarbiausia – jo suteikiama trauka. Aptariamas propelerio atliekamas *darbas*, kaip tas darbas yra apibūdinamas t. y. traukos, galingumo koeficientais ir naudingumu; kaip pritaikoma momentų ir menčių elementų teorija. Plačiausiai nagrinėjami jau esami propeleriai, medžiaga, iš kurios gaminamas propeleris, bei darbo metu atsirandantys įtempiai (lenkimo ir tempimo). Taip pat aiškinamasi, kaip sukurti optimaliausią propelerį, kuris galėtų geriausiai atlikti skirtą darbą.

Tai, kas iš pradžių atrodė gana paprasta, kuo toliau, tuo darėsi vis sunkiau. Kai lėktuvas juda į priekį, pratekantis oras metamas atgal, propeleris nuolat sukasi, taigi nėra atspirties taško. Ši situacija atrodė šiek tiek trikdanti.

Orville Wright, „How We Invented the Airplane“

Nepaisydami šių keblumų, broliai Wrightai išsprendė propelerių problemą. Knygoje stengiamasi atkreipti skaitytojo dėmesį į reikalingus faktus bei suteikti aiškumo.

1. PROPELERIS

Propelerio tikslas – pakeisti variklyje atsirandančius veleno sukamuosius judesius į tiesioginį orlaivio judėjimą. Propelerio sukimasis paverčia veleno sukimosi momentą orlaivio traukos galia. Šis konvertavimas vyksta dėl didelio oro kiekio įtraukimo ir suteikiamo nedidelio greičio prieaugio (10 m/s), kad besikeičiantis momentinis oro srautas suteiktų propelerio mentėms traukos jėgą. Trauka perteikiama per slėgio pasikeitimą ir paviršiaus trintį ant viso menčių paviršiaus ploto; šių komponentų suma sukuria traukos jėgą propelerio sukimosi ašimi. Traukos jėgą padauginus iš orlaiviui suteikto greičio, gaunama išvystoma traukos galia. Taigi propeleris yra įtaisas, absorbuojantis variklio veleno galią ir gaminantis traukos galią orlaiviams varyti. Kartais literatūroje propeleriai vadinami oro sraigtais, nes jie sukasi per orą be slydimo.

Propeleris gali būti įmontuotas orlaivio priekyje arba gale. Dažniausiai traukiantieji propeleriai montuojami orlaivio priekyje ir jie kartais vadinami traukiamaisiais oro sraigtais, o propeleriai, įmontuoti orlaivio gale, dėl orlaivio stūmimo pirmyn yra vadinami stumiančiais. Abiem atvejais pagrindiniai sraigto bruožai lieka tie patys.

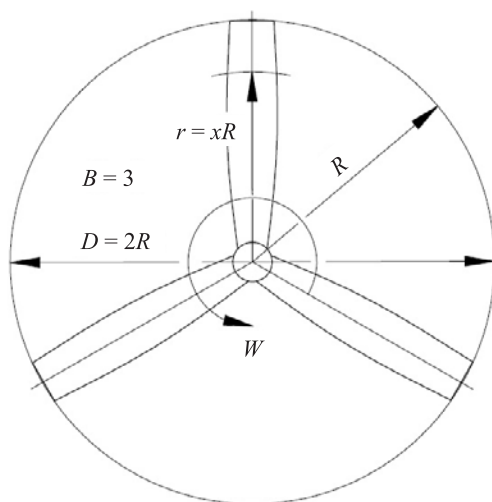
1.1. Propelerio geometrija

Propeleris turi radialinės krypties mentes, kurių skaičius kinta nuo dviejų iki penkių – tai priklauso nuo projektuotojo; dažniausiai propeleriai turi dvi, tris ar keturias mentes. Dviejų menčių propeleris parodytas 1.1 pav. Visos propelerio mentės yra identiškos formos ir sumontuotos ant kūgio formos įvorės arba stebulės ar oro sraigto aptako.

1.2 pav. raidė B žymi menčių skaičių, šiuo atveju – trys mentės, raidė R žymi propelerio spindulį, taigi diametras $D = 2R$. Kiekvienoje propelerio padėtyje išilgai mentės yra pjūvio spindulys r (arba santykinis pjūvio padėtis $x = r/R$), kaip pažymėta 1.2 pav. tarp propelerio tvirtinimo ašies, kur yra aerodinaminis mentės pjūvis (čia profilis apibūdintas tam tikru vardu bei numeriu) ir mentės tam tikros dalies pjūvio pločiu arba stygos ilgiu $c(x)$, didžiausiu pjūvio santykiniu storiu $r(x)$ bei kampu $\beta(x)$.



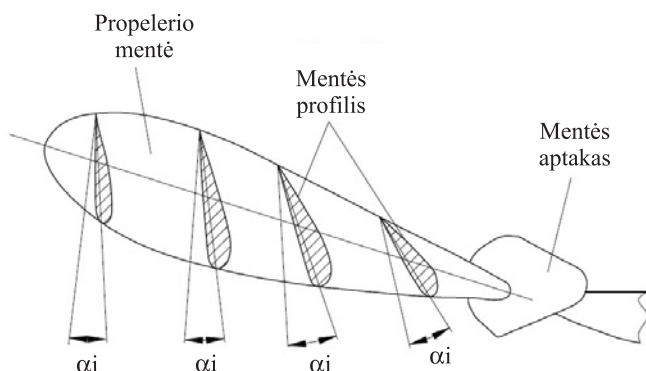
1.1 pav. Dviejų menčių propeleris



1.2 pav. Propelerio menčių skaičius, diametras ir santykinis pjūvis

Aerodinaminė menčių konstrukcija reikalauja, kad ji gamintų maksimalią traukos galią, o pasipriešinimo galia būtų minimali. Šis konstrukcijos poreikis yra panašus į maksimalią sparno kėlimo jėgą ir minimalų pasipriešinimą. Mentės skerspjūvis yra labai panašus į mažo pasipriešinimo, didelio ikigarsinio orlaivio sparno profilį. Kampas tarp sukamosios plokštumos (propelerio plokštumos) ir sparno profilio linijos, jungiančios sparno priekinį ir galinį kraštą bet kurioje men-

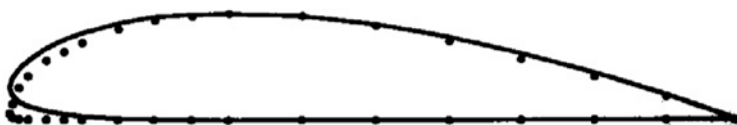
tės dalyje, vadinamas žingsnio kampų ir žymimas β . Žingsnio kampas nėra pastovus išilginiam propelerio mentės ilgiui. Taigi $\beta = \beta(R)$, jis reiškia, kad žingsnio kampas β yra radialinio atstumo r funkcija, kuri gali būti išmatuojama nuo propelerio pagrindo. 1.3 pav. matyti dviejų skirtingų skerspjūvių žingsnio kampai išilgai radialinės krypties. Žingsnio kampas yra labai mažas (artimas nuliui) viršūnėje, bet padidėja beveik $\pi/2$, kai priartėja prie propelerio pagrindo.



1.3 pav. Propelerio menčių žingsnio kampai netoli viršūnės ir pagrindo

Verta paminėti, kad anksčiau literatūroje propelerio žingsnis būdavo apibrėžiamas kaip atstumas, kurį įveikia orlaivio propeleris visiškai apsisukęs.

Kampas β paprastai atidedamas kaip 1.4 pav., t. y. tarp propelerio sukimosi ašies ir kitos profilio plokštumos pusės. (Kai mentės profilis sudarytas iš dviejų išgaubtų dalių, plokštuma imama ta linija, kuri jungia tas dvi išgaubtas dalis.) Kai kuriais atvejais (pvz., *Clark Y* pjūvis) kampas β matuojamas nuo nulinės linijos, kuri yra ant priekinės mentės briaunos (būtina žinoti kuris kampo β matavimo būdas pritaikomas konkrečiu atveju). Iš pradžių nagrinėsime pastovaus žingsnio propelerius.



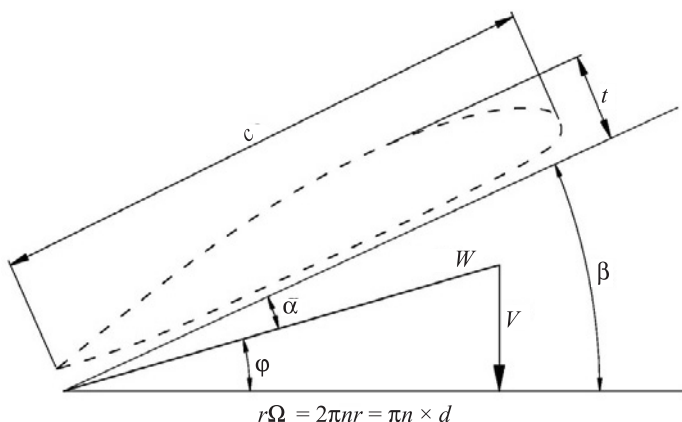
1.4 pav. Clark Y ir RAF6 propelerio mentės pjūvis

Propelerio dydį nusako jo spindulys R arba diametras D . Visa kita – B , $c(x)$, $t(x)$, $\beta(x)$, taip pat mentės profilio forma nusako propelerio formą. Laikysime, kad srautas mentės pasiekia statmenai.

Dauguma bendrosios aviacijos propelerių turi *Clark Y* arba dažniau *RAF6* profilius (vėlesnės modifikacijos turi įgaubtesnį profilio paviršių). Teiginys, kad propeleris turi *RAF6*, iš tikrųjų reiškia, kad jis turi *RAF6* profilį, individualią stygą $c(x)$ bei santykinį storį $\tau(x) = t(x)/c(x)$. Lentelėje 1.1 pateiktos ordinatės, nusakančios *RAF6* profilio formą. *RAF6* profilio priekinis kraštas yra 0,1 diametro, o galinis 0,08.

1.2. Informacija apie McCauley tipo propelerį

1968 m. *Cessna 172P* propeleris *McCauley 1C160/DTM7557* turi *RAF6* tipo profilį. *1C160* yra pagrindinis formą nusakantis numeris.



1.5 pav. Propelerio mentė su pažymėta styga c , storis t , oro greitis W

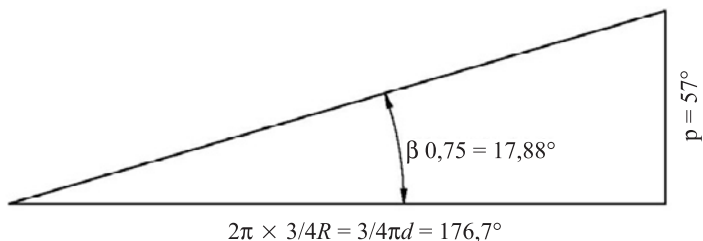
1.1 lentelė. RAF6 briaunų diametrai ir ordinatės

Stygos dalis	Ordinatė
0,025	0,41
0,05	0,59
0,10	0,79
0,20	0,95
0,30	0,998
0,40	0,99
0,50	0,95
0,60	0,87
0,70	0,74
0,80	0,56
0,90	0,35

DTM raidės pateikia informaciją apie reikiamo tipo veleną, ant kurio bus montuojamas propeleris, taip pat apie menčių kontūro tipą ir pan. Skaičius 75 reiškia, kad propelerio diametras yra $D = 75$ colių = 6,25 pėdų (1 colis = 25,4 mm; 1 pėda = 304,8 mm). Paskutinis skaičius 57 nusako propelerio žingsnį, kurį propeleris nueitų atlikdamas visą apsisukimą be slydimo. Nominalusis žingsnis gali būti išreikštas per nominalų mentės atakos kampą, $r = 0,75$; $\beta_{0,75}$. Tarkime, visas propelerio apsisukimas vyksta uždaramame cilindre, kurio spindulys $0,75R$. Jeigu perpjausime tą cilindrą (1.4 pav.), matysime trikampį, kurio kampas:

$$\beta_{0,75} = \tan^{-1} \frac{P}{0,75\pi d}. \quad (1.1)$$

Taigi *DTM7557*, kitaip sakant, $\beta_{0,75} = 17,88^\circ$, tačiau čia tik viena mentės dalis. Propelerio remonto žinyne galima rasti kelių mentės pjūvių linijinius matmenis bei kampus. Lentelėje 1.2 pateikti linijiniai matmenys coliais. Šioje lentelėje nėra duomenų mentės pjūviuose, kurie yra arčiausiai propelerio tvirtinimo ašies. Taip yra todėl, kad mentės vieta šalia propelerio tvirtinimo ašies yra labai stora, todėl tiksliausiai susukimo kampą geriausia pamatuoti su matavimo prietaisu priėjus prie tam tikro lėktuvo.



1.6 pav. Atsuktas *McCauley 7557* $r = \frac{3}{4}R$ propelerio sraigtas

1.2 lentelė. Duomenys iš *McCauley IC160* propelerio remonto instrukcijos

Pjūvio spindulys r	Santykinis spindulys x	Styga c	Storis t	Mentės kampas β , °
5	0,133	5,634	2,432	Netaikoma
9	0,24	5,766	1,190	Netaikoma
12	0,32	5,796	0,920	Netaikoma
15	0,40	5,826	0,460	26,83
18	0,48	5,776	0,650	24,28
24	0,64	5,326	0,510	20,00
30	0,80	4,510	0,390	17,00
33	0,88	3,910	0,335	15,80
36	0,96	2,981	0,258	14,80

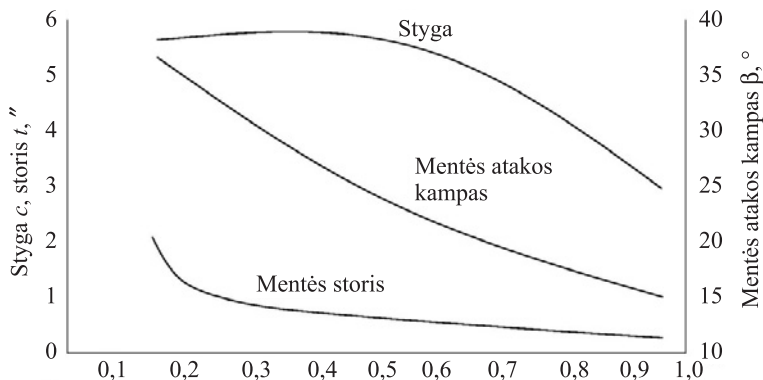
Propelerio skaičiavimus patogiausia atlikti pasirenkant tam tikrą mentės pjūvio vietą. Naudojantis 1.2 lentelėje pateiktais duomenimis galima nubraižyti grafiką, kuris rodo, kaip išilgai mentės kinta jos stygos ilgis, susukimo kampas ir mentės santykinis storis, čia santykinis storis $t(x)$ ir stygos ilgis $c(x)$ pateikti coliais, o mentės susukimo kampas $\beta(x)$ – laipsniais.

$$c(x) = \sqrt{26,50 + 45,11x - 65,99x^2}, \quad (1.2)$$

$$t(x) = (0,33546 + 6,7181x - 9,2040x^2 + 6,767x^3), \quad (1.3)$$

$$\beta(x) = 43,375 - 49,801x + 20,929x^2. \quad (1.4)$$

Nuo geometrijos skaičiavimų pereisime prie praktikos.



1.7 pav. McCauley 7557 propelerio geometrijos kreivės

1.3. Propelerio darbas ir matmenų analizė

Visi pastovaus žingsnio propeleriai turi suktis optimaliausiu parinktu kampiniu greičiu, n apsisukimų per minutę $N = 60n$. Priklausomai nuo sukimosi greičio, propelerio menčių forma sukuria pasipriešinimo momentą Q (kitaip vadinamą stabdymo momentu M), traukos jėgą T bei nusako sunaudojamą galią propeleriai sukti P . Kas dar mums svarbu? Propelerio trauka gali būti sukurta tik esant tam tikram oro tankiui ρ , trauka nesukuriama esant vakuumui! Taip pat labai svarbus lėktuvo skridimo greitis, dėl jo atsiranda aerodinaminės jėgos, jos kinta priklausomai nuo to, kurį propelerio mentės r pasirinksimė.

Čia paminėti septyni svarbiausi veiksniai. Visa tai galime šiek tiek supaprastinti eliminuodami P ir M , nes juos galime išreikšti formule:

$$P = 2\pi n M. \quad (1.5)$$

Labai svarbi sunaudojama galia, taigi pradėkime nuo jos. Žinome propelerio formą ir šešis, tarpusavyje nesusijusius dydžius: d , n , ρ , P , T ir V . Kaip jau minėjome, čia svarbiausia variklio sunaudojama galia P ir propelerio sukuriamą trauką T . Bet šitų turimų dydžių, deja, neužtenka. Egzistuoja metodas (teorema), kuriai užtenka turimų dydžių.

Bukingemo II teorema: jeigu kokia nors lygtis vienalytė dimensijų atžvilgiu, pvz.: n , tai ją galima pertvarkyti į lygtį m , kurios nariai

bus bedimensiai deriniai, sudaryti iš pirmosios lygties narių – $(m-n)$. Be to, šios $(m-n)$ grupės gali būti susietos algebriniais ir grafiniais ryšiais $(m-n-I)$. Dauguma fizikinių dydžių turi tam tikras dimensijas. SI vienetų sistema sudaryta iš ilgio (metrų, m), jėgos (Niutonų, N) ir laiko (sekundžių, s) (Britanijos (imperinė) vienetų sistema sudaryta iš ilgio (pėdų, ft), jėgos (svarų, lbf) ir laiko (sekundžių s). Susiję dydžiai yra ilgis L , jėga F bei laikas T . Masė išreiškta per kiekio ir vienetų dydžius ($N \cdot s^2/m$), o dimensijos – per $FL^{-1}T^2$. Taigi tankio matavimo vienetai $masė/m^3$ ir dimensija $FL^{-4}T^2$. Įdomesnė kampo matavimo vienetų situacija. Dažniausias kampo matavimo vienetas yra laipsnis. Tačiau moksliniuose darbuose naudojami radianai, radianas yra kampas, atitinkantis vienetinio ilgio apskritimo lanką vienetinio spindulio apskritime. Taigi kampams matuoti naudosime bedimensius dydžius. Lentelėje 1.3 galime rasti šešių pagrindinių propelerio parametrų matavimo vienetus ir dimensijas.

Pagal *Bukingemo II* teoremą mūsų atveju $m = 6$, nes dimensijos F , L ir T panaudojamos bent kartą šiems parametrų nusakymui, $n = 3$. Taigi $(6 - 3) = 3$. Prieš tai turėjome šešis dydžius, iš kurių reikėjo penkių ryšių jiems nustatyti, dabar liko tik trys ryšiai, kuriems nustatyti reikia tik dviejų tarpusavio ryšių. Jeigu nustatysime šias tris dimensijų grupes, sutaupysime daug laiko. Jeigu taip neatsitiks, vis dar reikės penkių ryšių šešioms dimensijoms nustatyti, o tai užtruktų papildomai laiko. Tačiau dabar nustatysime tris bedimensių dydžių grupes.

Du iš šių bedimensių dydžių nustatomi pagal 1.3 lentelės dimensijų stulpelį, kurio pirmoje, antroje, trečioje ir ketvirtoje eilutėse dydis V/nd yra bedimensis. Šis bendras dydis vadinamas *Propelerio poslinkiu* ir žymimas raide J . Per vieną sekundę lėktuvas nuskrenda atstumą V , o propelerio galas – atstumą $n\pi d$, šis santykis (be raidės π) pavadintas raide J .

Žiūrėdami į paskutiniąsias tris eilutes matome, kad TV/P , santykis žinomas kaip propelerio naudingumas η , taip pat yra bedimensis dydis.

Kad gautume trečią ir paskutinę nepriklausomas bedimenses grupes (nepriklausomos reiškia nesusumuotą, skirtingą, produktą arba

koeficientą, kaip prieš tai gautų grupių), turime sukurti naują produktą nesinaudodami vienu iš J dydžių (V, n, d) taip pat vienu iš η dydžių (T, P, V). Nesinaudosime dydžiu V (jis naudojamas abiejose ankstesnėse grupėse) ir P . Taigi gautą dimensija mus tenkina:

$$[dn^a \rho^b T^c] = L \times T^{-a} \times F^b L^{-4b} T^{2b} \times F^c. \quad (1.6)$$

Dešinioji lygties (1.6) pusė $LT^{-a} F^b L^{-4b} T^{2b} F^c$. Kadangi visi dydžiai yra bedimensiai, visi trys komponentai turi būti lygūs nuliui.

1.3 lentelė. Šeši propelerio kintamieji dydžiai su vienetais ir dimensijomis

Kintamasis	Reikšmė	Dimensija	Vienetai
d	Propelerio skersmuo	L	m
n	Kampinis greitis	T^{-1}	s^{-1}
ρ	Oro tankis	FT^4T^2	$N \cdot s^2/m^4$
V	Tikrasis oro greitis	LT^{-1}	m/s
P	Galia	FLT^{-1}	$m \cdot N/s$
T	Trauka	F	N

Taigi: $b = 1/4$, $a = 1/2$ ir $c = -1/4$. Iš čia išeina, kad dydis $dn^{\frac{1}{2}} \rho^{\frac{1}{4}} T^{-\frac{1}{4}}$ yra bedimensis. Pakeldami dydį ketvirtuoju laipsniu gauname $d^4 n^2 \rho T^{-1}$. Taigi propelerio traukos koeficientas:

$$C_T \equiv \frac{T}{\rho n^2 d^4}. \quad (1.7)$$

Kitaip sakant C_T , skirtingoje vietoje ir skirtingu laiku aerodinamiškai šie koeficientai šiek tiek skiriasi (1.7), taigi trauka prilyginama keliamajai jėgai, o traukos koeficientas – keliamosios jėgos koeficientui. Taigi C_T , kaip ir C_L , priklauso nuo jėgos, oro tankio ir oro greičio kvadrato. Laikysime, kad propelerio plotas lygus d^2 . Oro srauto greitis bus linijinis mentės galiuko greitis, $2\pi nR = \pi nd$. Nekreipiant dėmesio į π^2 , naudodami tris dydžius nustatome bendrą vardiklį (1.7 pav.).

Dabar turime tris bedimensių dydžių grupes J, η, C_T . Yra keletas būdų, kaip atlikti šia analizę. Vietoj dydžių FLT galime naudoti MLT . Šį kartą negrįšime prie gausybės dimensinių dydžių. Nesvarbu, kaip

spręsimė šį uždavinį, atsakymas visada bus tas pats $(6 - 3) = 3$ – trys nepriklausomos bedimensių dydžių grupės.

Svarbiausios bedimensių dydžių grupės, nusakančios propelerio darbą $\{J, C_T, C_P\}$; čia C_P – propelerio sunaudojamos galios koeficientas:

$$C_P \equiv \frac{P}{\rho n^3 d^5}. \quad (1.8)$$

Kaip propelerio sukuriamą trauką palyginome su keliamąja sparno galia, galime paaiškinti ir C_T , žiūrėdami į galią C_P kaip į jėgą per laiką. Šios prielaidos dėl dviejų propelerio koeficientų rodo, kad $\eta = \frac{TV}{P}$ ir gali būti išreikštas kaip:

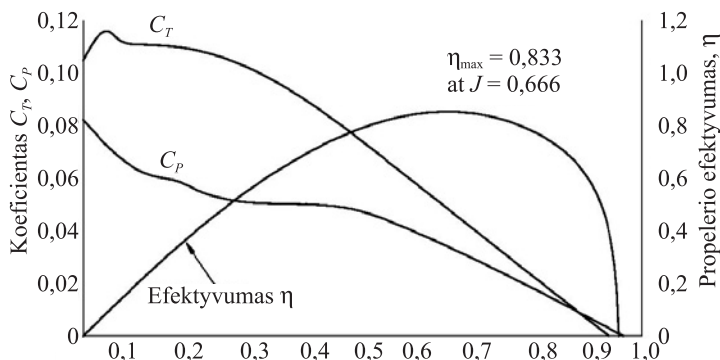
$$\eta = J \frac{C_T}{C_P}. \quad (1.9)$$

Taikydami tokią išraišką nieko neprarandame, nes turėdami J , $C_T(J)$, $C_P(J)$ vis tiek galime nustatyti η . Santykinis dydis J čia figūruoja kaip nepriklausomas kintamasis, nes jis priklauso nuo kinematinų dydžių, beveik nepriklausomų nuo judėjimo. Galia ir trauka yra dinaminiai dydžiai, priklausomi nuo veikiančių jėgų bei pagreičių. Pabandysime sudėtingą dalyką paaiškinti kuo paprasčiau. Nieko neprarasime, jeigu sakysime, kad C_P reikšmė pastovaus žingsnio propeleriui naudinga paverčiant $C_P(J)$, norint rasti J .

Svarbiausia apskaičiuoti reikiamo propelerio formą su pasirinktais koeficientais $Cl(\alpha; \tau)$ ir $Cd(\alpha; \tau)$. Tai padaryti galėsime pagal $C_T(J)$ ir $C_P(J)$ grafikus. Šituo metodu buvo sukurtas *McCauley* tipo *Cessna 172P* propeleris.

Kokią įtaką šiems skaičiavimams turi *Reinoldso* skaičius (Re) ir *Macho* skaičius (M)? Paaiškėjo, kad lėktuvų propeleriai dydžiu ir greičiu skiriasi per mažai, todėl Re įtaka per maža. Tačiau tai negalioja *Macho* skaičiui. Kai propelerio galiuko sukimosi greitis pasiekia greitį, lygų M 0,85, labai sumažėja jo naudingumas. Siekiant sumažinti šį neigiamą efektą, naudojamos strėlinio tipo mentės. Mentės gaminamos plonesnės ir didinamas jų skaičius. Nenagrinėsime atvejų, kai greičiai didesni už artimus garso greičiams. Viską susumavus galima

daryti išvadą, kad Reinoldso skaičius beveik neturi įtakos skaičiavimams, tačiau *Mach*o skaičius labai svarbus.



1.8 pav. McCauley 7557 propelerio charakteristikos

Propelerio darbas priklauso nuo dviejų tarpusavyje susijusių ryšių. Tie ryšiai – tai dinaminės jėgos: 1) tangetinės jėgos, atsirandančios dėl oro pasipriešinimo sukantis propelerui (sukimo momentas) ir išreiškiamos $C_P(J)$ ir 2) ašinės jėgos, atsirandančios, kai propeleris meta orą už savęs, ir išreiškiamos $C_T(J)$. Taip pat atsiranda radialinės jėgos mentės viduje, išilgai mentės ilgio, tačiau čia mes jų nenagrinėsime, laikydami, kad mentė subalansuota ir propelerui sukantis nepa-ilgėja. Dabar turime dvi jėgas, veikiančias skirtingomis kryptimis, ir dvi koeficientų funkcijas joms paaiškinti. Taigi turime viską, ko reikia dimensijų analizei atlikti.

Nors dimensijų analizės metodas sumažina reikiamą ryšių skaičių, tačiau to ne visiškai užtenka $C_P(J)$ ir $C_T(J)$ nustatyti. Čia išky-la aerodinaminė problema, reikalaujanti su aerodinamika susijusio sprendimo. Jėgos, slėgiai, sukimo momentai ir energijos – elementai iš mechanikos, kurie turės būti pritaikyti visi norint rasti reikalingą atsakymą. Dabar turėsime nagrinėti dvi visiškai skirtingas teorijas: *momentų teoriją* ir *mentės elementų teoriją*. Susieję šias dvi teorijas gausime tarsi šių dviejų teorijų mišinį.

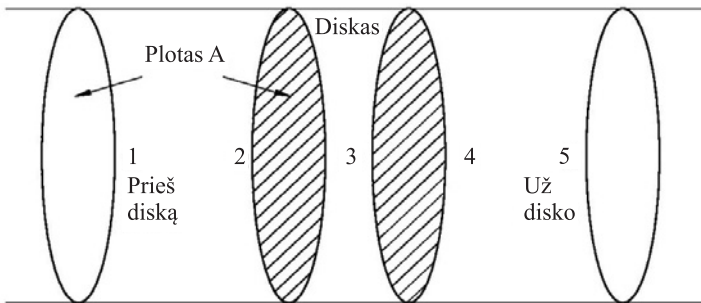
2. MOMENTŲ TEORIJA

Propeleris sukuria trauką mesdamas pro jį pratekantį orą atgal. Pagal trečiąjį Niutono dėsnį oras veikia propelerį tokia pačia jėga kaip ir propeleris jį. Dėl pratekančio oro srauto kinta ir kinetinė energija, statinis slėgis bei kampinis momentas. Šiuos reiškinius analizuoja momentų teorija, kurios pagrindinis tikslas – nustatyti geriausią propelerio suvartojamos galios, sukuriamos traukos bei jo naudingumo santykį. Anglų kalba ši teorija vadinama *broad-brush*. Jos esmė – propeleris pakeičiamas disku, turinčiu begalę menčių, jo plotas $A = \pi d^2/4$. Nors neatrodo, kad šis būdas atkartotų realias sąlygas, bet jis gana geras.

2.1. Realus pavyzdys

Išnagrinėsime, kaip oras prateka per propelerį. Išskiriamos penkios pagrindinės oro srauto padėties:

- 1) nesujauktas oras toli prieš propelerį;
- 2) oras, pratekantis tiesiai prieš propelerį;
- 3) oras, pratekantis pro propelerį;
- 4) oras už propelerio;
- 5) nesujauktas oras toli už propelerio.



2.1 pav. Penki svarbiausi momentų teorijos oro srovės pjūviai

2.1 pav. oro srautas vaizduojamas cilindro formos, nes viena pagrindinių momentų teorijos sąlygų yra ta, kad oro srautas už propelerio slysta nežymiai ir į tai neatsižvelgiama. (Tai pritaikoma, kai momentų

teorija naudojama nagrinėjant propelerio trauką, kai oro srauto greitis lygus nuliui [$V = J = 0$].) Svarbiausi oro srauto kintamieji pavaizduoti 2.1 lentelėje.

Ašinio ir sukimosi pasipriešinimo veiksniai

Ašinis pasipriešinimas a kyla proporcingai didėjant oro srauto greičiui V prieš propelerį iki $V(1+a)$. Sukimosi pasipriešinimas a' proporcingas propelerio sukimo greičiui, jis kinta nuo 0 iki $\omega = a'\Omega$, čia Ω yra propelerio kampinis greitis. Mentės paveiktas oro srautas turi didesnę greitį ašine kryptimi nei tangentine. Mes negalėsime išnagrinėti dviejų pasipriešinimo veiksnių, kol nesujungsime momentų ir mentės elementų teorijų – pačių sunkiausių mūsų nagrinėtų teorijų.

2.1 lentelė. Momentų teorijos oro srovės kintamieji ir pjūviai

Padėtis	Oro greitis	Kampinis greitis	Slėgis	Disko plotas
1	V (nesutrukdyta tėkmė)	0	p (aplinkos)	$>A$
2	$V(1+a)$	0	$p - \Delta p_2$	A
3	$V(1+a)$	$a'\Omega$	–	A
4	$V(1+a)$	$x\Omega$	$p + \Delta p_4$	A
5	$V(1+b)$	$b'\Omega$	p	$<A$

Tačiau čia galime nustatyti tokius kintamuosius kaip b ir b' vietoj a ir a' , sukamąjį veiksnį x , tiesiai už propelerio bei slėgių skirtumus Δp_2 ir Δp_4 . Taip pat galime geriau nustatyti šio varomojo proceso naudingumą.

Tam tikra prasme pasipriešinimo efektas čia antraeilis. Bet į tai neatsižvelgti vis tiek negalima. Kol kas susitelkę tik ties lėktuvu, bet pabandykime pažvelgti oro molekulės aspektu. Tarkime, lėktuvas artėja į molekulę šiek tiek virš ir šiek tiek į šoną nuo jos. Taigi molekulė iš pradžių metama aukštyn, o už sparno – žemyn. Molekulei pasiseka, kad ji neįtraukiama į kokią nors sūkurį ar dar blogiau – neatsiduria propelerio kelyje. Šį pavyzdį pasitelkėme tam, kad suprastume, jog lėk-

tuvas turi įtakos atmosferai, ir atvirkščiai – atmosfera turi tam tikros įtakos lėktuvui. Taigi panagrinėkime, kas vyksta atmosferoje.

2.2. Trauka ir slėgis

Pagal momentų teoriją trauka aprašoma dviem būdais: 1) oro srauto momento kitimu per laiką ir 2) grynu slėgiu, tenkančiu propelerio disko velenui. Jeigu pamėginsime apskaičiuoti trauką abiem būdais, galėsime nustatyti pasipriešinimo faktoriaus a ir maksimalaus pasipriešinimo faktoriaus b ryšį. Be to, sutelkdami dėmesį į varomojo judėjimo ir oro srautui perduodamos kinetinės energijos santykį, galėsime apskaičiuoti viso šio proceso idealų naudingumą.

Trauka #1. Tam tikro skysčio masės kitimas (masės kiekis per laiko vienetą), kurio tankis ρ , judėjimas per plotą A greičiu V yra ρAV . (Greitis V pagal ašinį pasipriešinimo veiksnį padidėja iki $V[1+a]$.) Oro srauto slydimas padidėja iki bV , taigi:

$$\begin{aligned} T &= \text{masės...kitimas} \times \text{padidėjęs...greitis} \\ &= \rho AV(1+a) \times bV \\ &= \rho AV^2(1+a)b \end{aligned} \quad (2.1)$$

Trauka #2. Laikysime, kad sukuriama trauka – tai slėgių skirtumas prieš diską (pozicija 2) ir už disko (pozicija 4). Įrodysime tai taikydami Bernulio lygtis prieš diską ir už jo:

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho V_1^2(1+a)^2, \quad (2.2)$$

$$p_4 + \frac{1}{2}\rho V_1^2(1+a)^2 = p_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2(1+b)^2. \quad (2.3)$$

Suprastinę (2.2) ir (2.3) gauname tokią išraišką:

$$p_4 - p_2 = \frac{1}{2}\rho V_1^2 b(1+b/2). \quad (2.4)$$

Iš čia:

$$T = A(p_4 - p_2) = \rho AV^2 b(1+b/2). \quad (2.5)$$

Sulyginę (2.1) ir (2.5) lygtis gauname: $b = 2a$. Tai momentų teorijos apie trauką formulė, todėl:

$$T^{MT} = 2\rho AV^2 a(1+a). \quad (2.6)$$

Tai diferencialinė forma, nusakanti traukos padidėjimą disko žiede tarp r ir $r + dr$ padėčių (šito reikės vėliau):

$$dT^{MT} = 2\rho 2\pi r dr V^2 (1+a)a = 4\pi r \rho V^2 (1+a) a dr. \quad (2.7)$$

Didžiausias ašinio greičio padidėjimas būna ties puse propelerio diametro. Šiame procese išskaidomas klampumas, sulėtinantis srauto slydimą.

Norėdami apskaičiuoti slėgio kritimą antroje pozicijoje, pasinaudosime (6.2) formule. Turime, kad $\Delta p_2 = qa(2+a)$, čia q – aplinkos dinaminis slėgis $\frac{1}{2}\rho V^2$. Slėgis ketvirtoje pozicijoje $\Delta p_4 = qa(2+3a)$ visada yra didesnis už Δp_2 .

2.3. Idealus efektyvumas

Norint suprasti, kaip gaunamas idealus efektyvumas iš varomojo proceso, reikia pažvelgti į naudingos ir bendros galios santykį:

$$\eta_i = \frac{TV}{P}. \quad (2.8)$$

Kadangi oro greitis diske yra $V(1+a)$, vardiklis yra $P = \Delta KE$ per laiką $= \frac{1}{2} \times$ masės srautas $\times$ kvadrato greičių skirtumas:

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{2} qAV(1+a) (V_5^2 - V_1^2) \\ &= \frac{1}{2} qAV^3 (1+a) (4a - 4a^2) \\ &= 2qAV^3 a(1+a)^2. \end{aligned} \quad (2.9)$$

Naudodami mūsų ankstesnę traukos išraišką iš formulės (2.6), įrašome ją į formulės (2.8) skaitiklį,

$$\eta_i = \frac{2qAV^3 (1+a)a}{2qAV^3 (1+a)^2 a} = \frac{1}{1+a}. \quad (2.10)$$

Kadangi trauka didėja su ašinės interferencijos veiksnio a , 2.2 pav. rodo kad, momentų teorijos idealus efektyvumas yra didesnis, kai diskas yra lengvai apkrautas, o trauka yra mažesnė.

2.4. Efektyvumas ir galia

Nagrinėdami idealų sraigto efektyvumą, turime gauti dar vieną rezultatą. Idealaus efektyvumo ir sraigto galios koeficiento ryšys bus reikalingas braižant „bendrą sraigto diagramą“ pastovaus greičio sraigtams. Iš formulės (2.9) mes žinome, kad bendra jėga yra:

$$P = TV(1 + a) = 2qAV^2a(1 + a)^2 = pn^3d^5C_p. \quad (2.11)$$

Iš formulės (2.10) turime:

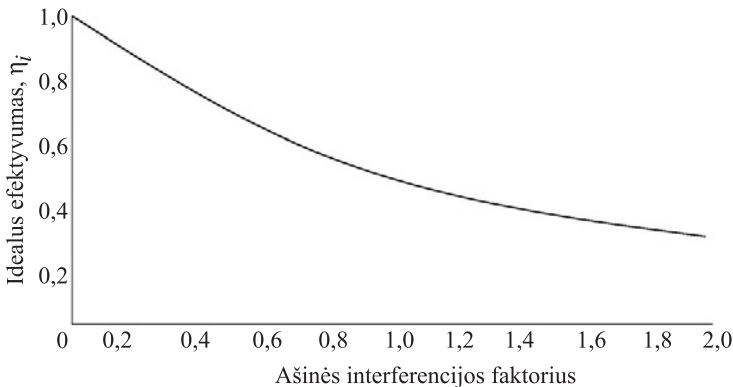
$$a = \frac{1 - \eta_i}{\eta_i}. \quad (2.12)$$

Todėl, naudodami $A = \pi d^2 / 4$, nustatome

$$C_p = \frac{\pi V^3 (1 - \eta_i)}{2n^3 d^3 \eta_i^3} = \frac{\pi J^3 (1 - \eta_i)}{2\eta_i^3}, \quad (2.13)$$

kuris gali būti pertvarkytas, kad gautume:

$$\frac{\eta_i}{(1 - \eta_i)^{1/3}} = \left(\frac{\pi}{2}\right)^{1/3} \frac{J}{C_p^{1/3}}. \quad (2.14)$$

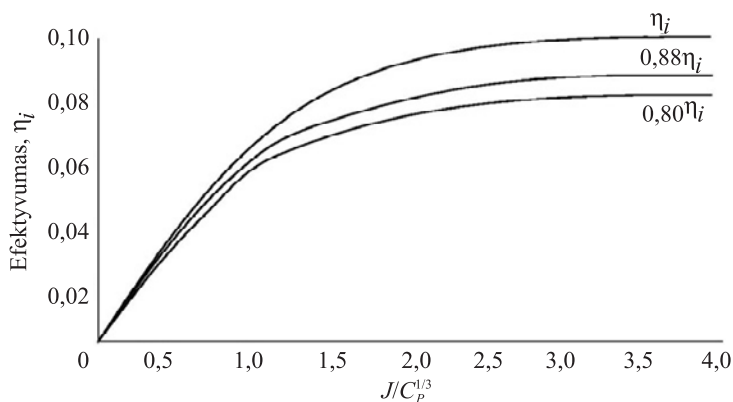


2.2 pav. Idealaus efektyvumo mažėjimas, didėjant ašinės interferencijos veiksniaiui a

Dydis $J / C_p^{1/3}$, esantis dešinėje formulės (2.14) pusėje, yra įdomus tuo, kad nepriklauso nuo sraigto apskritiminio greičio n . Jis priklauso tik nuo galios P ir oro greičio V (taip pat nuo oro tankio ir sraigto diametro). Kai žinoma galia ir oro greitis, formulėje (2.14) galima naudoti „idealius“ apribojimus.

Paveikslėlis 2.3 yra grafinė formulės (2.14) išraiška, su apytikrėmis „apribojančiomis“ realistinėmis kreivėmis. Idealus efektyvumas yra teorinė viršutinė sraigto efektyvumo riba. Netgi laisvame ore palankiais atvejais realus pasiekiamas efektyvumas yra nuo 80 iki 88 % η_i . Taip yra dėl papildomų nuostolių:

- slystančio srauto rotacijos (ją aptarsime);
- menčių profilinis pasipriešinimo (pagrindinio nuostolių veiksnio);
- menčių galo nuostolių ir stebulės pasipriešinimo;
- menčių interferencijos;
- traukos pulsacijų, kylančių dėl riboto variklio cilindų skaičiaus.



2.3 pav. Pirminė bendra propelerio diagrama

2.5. Slystančio srauto rotacija ir sukimo momentas

Propelerio slystančio srauto rotacija yra ta pačia kryptimi kaip ir propeleris, bet ne tokia greita. Norėdami apskaičiuoti keletą detalių, susitelksime ties viena sutartine propelerio padėtimi r . Taip darysime dėl dviejų priežasčių:

1. Dviejų panašių objektų rotacija apie bendrą ašį vienodu kampiniu greičiu w (rad/s), bet skirtingomis padėtimis r neturi vienodo kampinio momento:

$$Iw = mr^2 w, \quad (2.15)$$

nes inercijos momentas I priklauso nuo padėties r kvadrato.

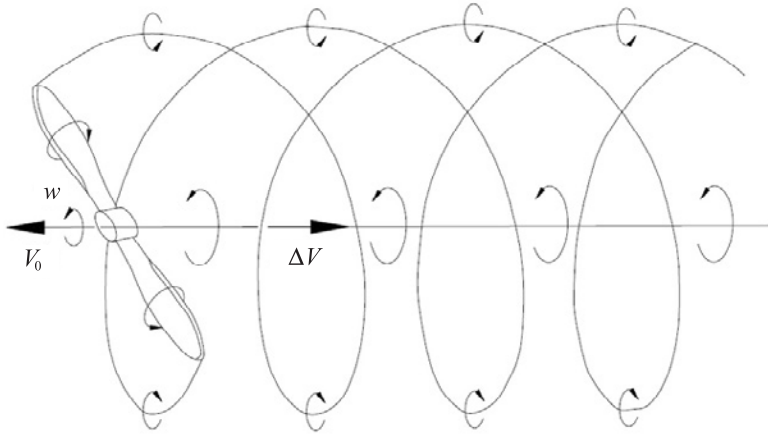
2. Propelerio sekcijos yra skirtingų padėčių, jos skiriasi daugeliu atžvilgiu (pločiu, kampu, storiu, realitviu vėjo greičiu, ir kampu). Į visus šiuos skirtumus turėsime atsižvelgti.

Taigi esant padėčiai r didėja sukimo momentas dQ diske tarp r ir $r + dr$. Nuolat kintantys dydžiai yra $\rho \times \text{plotas} \times \text{greitis}$.
 $= \rho \times 2\pi r dr \times V(1+a)$. Propeleris sukasi $\Omega = 2\pi n \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ ir slystantis oro srautas galiausiai sukasi $w_3 = w_4 = 2a'\Omega$. Taigi:

$$\begin{aligned} dQ^{MT} &= \rho \times 2\pi r dr \times V(1+a) \times r^2 2a'\Omega = \\ &= 4\pi r^3 \rho V(1+a)\Omega a' dr. \end{aligned} \quad (2.16)$$

Pagrindinė priežastis, kodėl rotacijos interferencijos veiksnio a' prie disko dvigubinasi ir virsta $2a'$ iškart už propelerio, yra subtili. Oro srauto rotacija apie propelerį iš dalies susidaro dėl propelerio mentelių apriboto sukurio, iš dalies dėl besidriekenčio sukurio. Sukury, besidriekiantis nuo propelerio galo krašto, užsisuka, kaip ir sparno sukuriai, į vieną didelį sukūrį, besidriekiantį nuo galo. Tai pat susidaro sukury, nuo propelerio menčių šaknų besidriekiantis žemyn propelerio ašimi (žr. 2.4 pav.). Mentės apribota sukurio linija sukelia lygų ir priešingą kampinį greitį pjūviuose 2 ir 4. Bet 2 pjūvyje neturi būti jokių tinklinių rotacijų, nes propelerio sukurio sistema dar nepasiekusi tos padėties. Taigi besidriekiančių sukurių nuo galiukų ir šaknų poveikis pjūvyje 2 turi panaikinti apribotų sukurių poveikį; šie du efektai yra lygūs ir priešingi. Vadinasi, besidriekančio sukurio poveikis pjūvyje (arba 5 pjūvyje nekreipiant dėmesio į klampą) turi būti dvigubo dydžio dėl arba apriboto, arba besidriekančio sukurių. Ties propelerio mente (pjūvis 3) interferencinė rotacija susidaro tik dėl besidriekiančių sukurių. Vadinasi, yra vienintelis $a'\Omega$ (žr. 2.2 lentelę, kurioje kam-

pinio greičio poveikiai dėl apriboto ir besidriekiančio sukurių žymimi atitinkamai Bd ir Tr).



2.4 pav. Apriboti ir besidriekiantys propelerio mentelės sukurių

2.2 lentelėje pavaizduota apriboto ir besidriekiančio sukurių poveikis kampiam greičiui įvairiuose pjūviuose slystančiame sraute. Pjūvyje 1, kaip ir pjūvyje 2, nėra rotacijos. Ši lentelė apibūdina, kodėl $w_4 = w_5 = 2a'\Omega$. Taigi dabar žinome, kad lentelėje 2.2, $x = b' = 2a'$.

Kuo momentų teorija naudinga? Sužinojome trauką T nežinomos ašies interferencijos veiksnio a' išraiška. Idealus efektyvumas η_i yra menkai paaiškintas. Ir sukimo momentas, pridėtas prie slystančio srauto žiedo esant r , nežinomos ašies interferencijos veiksnio a' išraiška. Tiksliau apskaičiavę idealaus efektyvumo, įskaitant energijos nuostolius dėl slystančio srauto rotacijos, gauname:

$$\eta_i = \frac{1 - a'}{1 + a'}.$$

Rotacinis interferencijos veiksnys a' yra beveik visada daug mažesnis negu ašies interferencinis veiksnys a . Taigi reikalinga mentės elementų teorija.

2.2 lentelė. Atriboto ir besidriekenčio sūkurių poveikis kampiniam greičiui įvairiuose slystančio srauto pjūviuose

Pjūvis	2	3	4	5
Galinis poveikis	0	a'		
Atriboto poveikis	–Bd	0	Bd	Bd
Besidriekiančio poveikis	Tr	Tr	Tr	Tr

3. MENČIŲ ELEMENTŲ TEORIJA

3.1. Fizinis paveikslas

Menčių elementų teorijos paprasčiausia versija yra naudoti paprastą aerodinaminę jėgą, argumentuojant tuo, kad mes visi ją naudojame taip pat:

$$\text{Jėga} = \text{dinaminis slėgis} \times \text{veikiamas plotas} \times \text{koeficientas} \quad (3.1)$$

3.1 paveiksle pavaizduotas jėgos rezultatas. Bendra didėjanti aerodinaminė jėga dF turi keliamosios ir pasipriešinimo komponentes dL ir dD , suderintas lygiagrečiai ir statmenas atstojamajai, oro srauto greičiui W . Bet komponentė dF nukreipta priekinio judėjimo kryptimi ir priešinga variklių traukos kryptimi yra dT ir dQ/r .

Išskaidykime formulę (3.1), kad gautume propelerio traukos išraišką didėjančiais traukai dT ir didėjančiais sukimo momentą gaminančiais jėgai dQ/r .

3.2. Reliatyvus judantis oras ir dinaminis slėgis

Atsirandantis reliatyvus judantis oras, veikiantis propelerio segmentus, turi greitį W ,

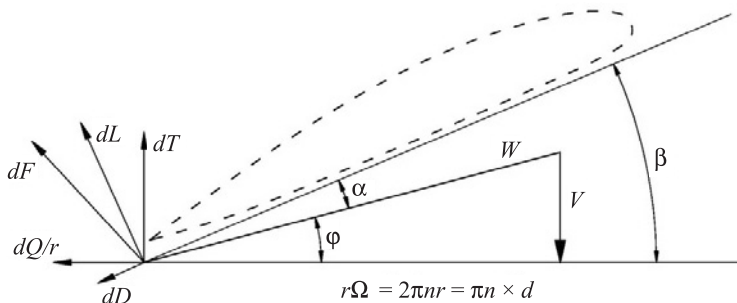
$$W^2 = V^2 + (\pi x n d)^2 = V^2 \left(1 + \frac{\pi^2 x^2}{J^2} \right). \quad (3.2)$$

Paminėtina taip pat, kad vadinamasis *srauto kampas*, φ , apskaičiuojamas:

$$\varphi = \beta - \alpha = \tan^{-1} \frac{V}{\pi x n d} = \tan^{-1} \frac{J}{\pi x}. \quad (3.3)$$

Taigi dinaminis slėgis yra:

$$\frac{1}{2} \rho W^2 = \frac{1}{2} \rho V^2 \left(1 + \cot^2 \varphi \right) = \frac{\rho V^2}{2 \sin^2 \varphi}. \quad (3.4)$$



3.1 pav. Mentės elemento oro srauto ir didėjančios jėgos komponentės

3.3. Pavienis plotas

Paimame mažą kiekvienos propelerio mentės mojo ploto dalį $dr = Rdx = (d/2)dx$. Propeleris turi B menčių. Taigi plotas veikia:

$$dA = Bc(r)dr = \frac{Bc(x)d}{2}dx. \quad (3.5)$$

3.4. Aerodinaminiai koeficientai

Yra keletas problemų naudojant standartinius propelerio profilio keliamosios ir pasipriešinimo koeficientus: 1) šių koeficientų vertės kokybė mažėja grafikams baigiantis 2) didėjantys keliamosios dL ir pasipriešinimo dD koeficientai nenurodo vektoriaus.

Iki šiol pirmoji problema yra pati svarbiausia. Naudosime tinkamus, apytikslus keliamosios ir pasipriešinimo koeficientus RAF6 propeleriui, pasiskolintas paprastas, pritaikomas prie kreivių formules, pasiūlytas *Norriso ir Bauerio*. Jos yra:

$$c_l(\alpha) = 0,09458(\alpha + 4,8),$$

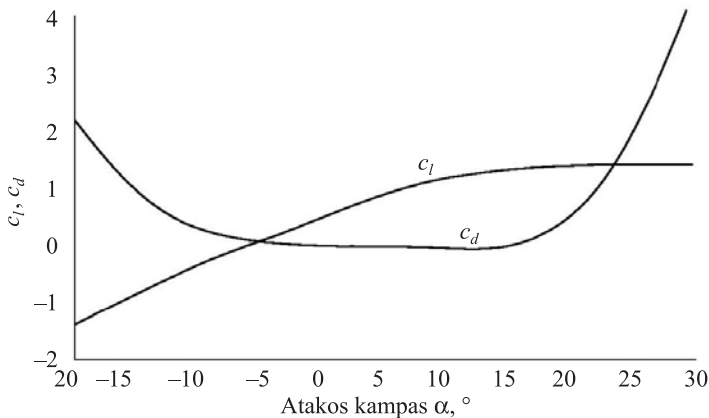
$$c_l(\alpha) = \frac{1,5 + c_l - \sqrt{(1,5 - c_l)^2 + 0,04}}{2}, \quad (3.6)$$

$$c_d(\alpha) = 0,009 + 0,03(4c_l/3 - 1)^4. \quad (3.7)$$

Norriso ir Bauerio koeficientų funkcijos nepriklauso nuo storio santykio $\tau = t / c$; preliminarus nulinis keliamasis kampas α_0 yra laikomas $-4,8$ laipsnio, pakėlimo nuožulnumas $0,09458$ esant bet kiam mentelės storiui. Toks laisvumas nėra visiškai realus, ypač kalbant apie α_0 , bet tai yra skaičiavimo principas; vienu metu matoma, kaip skaičiavimai vyksta, ir tuo pačiu metu galima patobulinti. 3.2 paveikslas yra grafikas *Norriso ir Bauerio* RAF6 keliamojo ir pasipriešinimo koeficientų funkcijos.

Kita problema – aerodinaminių jėgų komponentų orientacija, ji atliekama pasukant koordinačių sistemą laikrodžio rodyklės kryptimi kampu φ (žr 3.1 pav.). Taip mes galime gauti koeficientus λ_T ir λ_P , linijinius pagedaujamų jėgos komponentų derinius c_l ir c_d :

$$\begin{bmatrix} \lambda_T \\ \lambda_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_l \cos \varphi - c_d \sin \varphi \\ c_l \sin \varphi + c_d \cos \varphi \end{bmatrix}. \quad (3.8)$$



3.2 pav. *Norriso ir Bauerio* RAF6 kilimo ir pasipriešinimo koeficientų funkcijos

3.5. Menčių elementų traukos ir galios koeficientų lygybė

Sudėję kartu pastarųjų trijų poskyrių rezultatus, gauname dar iki galo neužbaigtas menčių elementų traukos ir sukimo momento lygybės formules:

$$\frac{dT^{BE}}{dr} = \frac{\frac{1}{2} Bc(r) \rho V^2 \lambda_T}{\sin^2 \varphi}. \quad (3.9)$$

$$\frac{dQ^{BE}}{dr} = \frac{\frac{1}{2} Bc(r) r \rho V^2 \lambda_P}{\sin^2 \varphi}. \quad (3.10)$$

Tikslą gauti funkcijas $C_T(J)$ ir $C_P(J)$ beveik pasiekėme. Reikia pakeisti nepastovius koeficientus ir juos integruoti.

Pirmo darbo pamatas jau padėtas. Naudodamiesi formule (1.5) apskaičiuojame variklio galią P iš absorbuoto sukimo momento Q . Propelerio traukos ir galios koeficientų apibrėžimai, formulės (1.7) ir (1.8), iš T, Q duoda mums C_T, C_P . Ir iš padėties r perkelia į realiatyvią padėtį x , kur $r = (d/2)x$ ir $dr = (d/2)dx$. Šie pokyčiai kartu su santykiu $J = \frac{V}{nd}$ formules (3.9) ir (3.10) pakeičia galutinėmis menčių elementų traukos ir galios koeficientų lygybės formulėmis:

$$\frac{dC_T^{BE}}{dx} = \frac{Bc}{4d} \frac{J^2 (c_l \cos \varphi - c_d \sin \varphi)}{\sin^2 \varphi}, \quad (3.11)$$

$$\frac{dC_P^{BE}}{dx} = \frac{\pi x Bc}{4d} \frac{J^2 (c_l \sin \varphi + c_d \cos \varphi)}{\sin^2 \varphi}. \quad (3.12)$$

Tai gana paprastas būdas gauti paprastas palyginti sudėtingų problemų išraiškas.

1 pavyzdys. Mūsų paprastam mentės elemento pavyzdžiui atsitiktinai pasirenkame $J = 0,6$ ir $x = 0,8$. Pritaikysime kreivę (*curve-fit*) geometrijos *Cesnos 172 McCauley* propelerui [formulės (1.2) ir (1.4)] su *Norriso ir Bauerio* keliamosios jėgos ir pasipriešinimo koeficientais [formulės (3.6) ir (3.7)].

1 žingsnis. Geometrija ir santykinis oro srauto greitis: propelelis turi dvi mentes $B = 2$, kurių diametras $d = 75 \text{ in} = 6,25 \text{ ft}$. Styga $c(0,8) = 4,512 \text{ in} = 0,3760 \text{ ft}$. Mentės kampas yra $\beta(0,8) = 16,929^\circ$.

Oro atitekėjimo kampas $\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{J}{\pi x}\right) = 13,427^\circ$, taigi atakos kampas (AOA) $\alpha = \beta - \varphi = 3,502^\circ$.

2 žingsnis. Koeficientai: preliminarus keliamosios jėgos koeficientas $c_l(3,502^\circ) = 0,7852$, gauname $c_l(3,502^\circ) = 0,7715$ ir $c_d(3,502^\circ) = 0,0150$. Pagal (2.13) formulę gauname $\lambda_T = 0,7469$ ir $\lambda_P = 0,1937$.

3 žingsnis. Duomenų rezultatai $J = 0,6$, $x = 0,8$: traukos koeficientas gaunamas iš (2.16) formulės $\frac{dC_T^{BE}}{dx} = 0,1500$; galios koeficientas gaunamas iš (2.17) formulės $\frac{dC_P^{BE}}{dx} = 0,09777$.

Pakartoję šį skaičiavimą didesniu diapazonu gauname reliatyvios padėties x grafiką (3.3 pav.), traukos galios koeficientų lygybę, kai $J = 0,6$.

Kad gautume koeficientus $C_T(J = 0,6)$ ir $C_P(J = 0,6)$, turime suskaičiuoti plotą po kreivėmis (3.3 pav.) Skaitinio integravimo trapezoidinė taisyklė, yra

$$\int_{x_0}^{x_n} f(x) dx = h \left[\frac{f_0}{2} + f_1 + f_2 + \dots + f_{n-1} + \frac{f_n}{2} \right]. \quad (3.13)$$

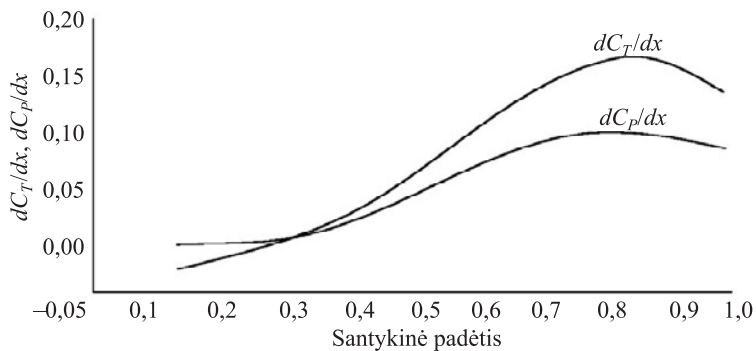
Čia h yra pastovaus intervalo ilgis ir f_i yra $f(x_i)$, yra visiškai pakankama. 3.3 pav. pateiktas galutinis šio propelerio mentės elemento rezultatas su šiais išgalvotais kėlimo ir pasipriešinimo koeficientais.

Taigi C_T ir C_P yra apskaičiuojamos kaip J išvestinės:

$$C_T = \frac{\pi}{8} \int_{x_h}^1 (J^2 + \pi^2 x^2) \sigma [C_l \cos(\varphi + \alpha_i) - C_d \sin(\varphi + \alpha_i)] dx. \quad (3.14 a)$$

Čia: $P = \omega Q$:

$$C_P = \frac{\pi}{8} \int_{x_h}^1 \pi x (J^2 + \pi^2 x^2) \sigma [C_l \sin(\varphi + \alpha_i) + C_d \cos(\varphi + \alpha_i)] dx. \quad (3.14b)$$

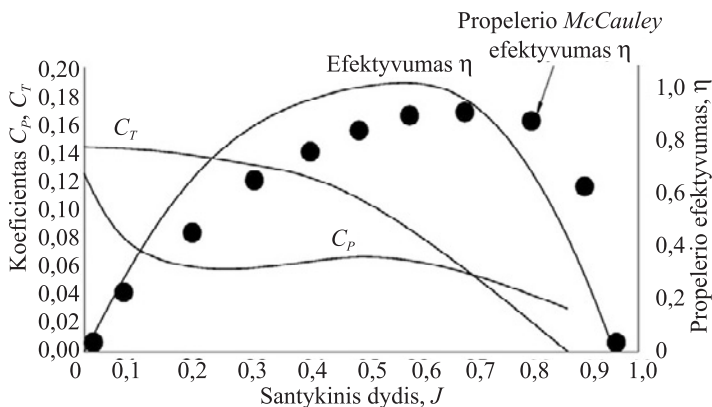


3.3 pav. Propelerio traukos ir galios koeficientų lygybė, kai $J = 0,6$

Jei palyginsime mentės elementų teorijos rezultatus (3.3 pav. ir 1.8 pav.), pamatysime, kad mentės elemento efektyvumo grafikas kyla aukščiau ir baigiasi anksčiau. Dabar nagrinėsime kitą ir daug sudetingesnę propelerio teorijos versiją.

4. JUNG TINĖ MOMENTO IR MENČIŲ ELEMENTŲ TEORIJA

Yra beveik tiek pat propelerio teorijos variantų, kiek ir rašančių apie tai. Bet beveik kiekvienas toks rašantysis vadina tai „jungtine momento ir menčių elementų teorija“. Tačiau kai kurie vadina ją „sūkurio teorija“. Momento teorija – negalutinė, įskaitant ašinį (a) ir kintantį (a') interferencijos veiksnius. Ir tai leido nustatyti diferencialinę trauką, formulė (2.7), ir diferencialinį sukimo momentą, formulė (2.16). Menčių elementų teorija neįvertina interferencijos efektų, bet gražiai ir paprastai paaiškina propelerio geometriją ir propelerio sekcijos kilmą bei pasipriešinimą koeficientų požiūriu. Formulės (3.9) ir (3.10) pateikė mentės elemento diferencialines traukos ir sukimo momento išraiškas. Kas gali būti natūraliau, kaip tik sujungti jas?



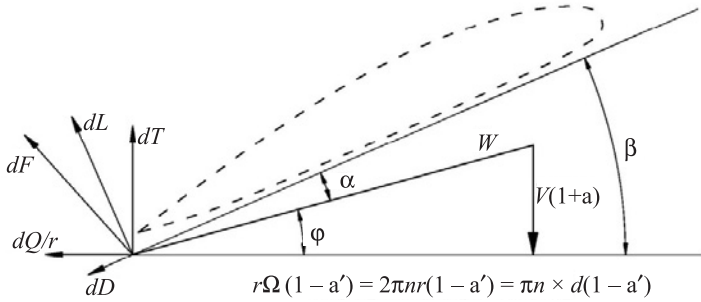
4.1 pav. RAF6 propelerio charakteristikos, apytikrė mentės elemento reikšmė

4.1. Realus paveikslas

Jungtinė momento / menčių elementų teorija (4.2 pav.) yra kilusi iš paprastos mentės elemento teorijos (3.1 pav.) su interferencijos veiksniumi. Šiuos du nežinomuosius sujungiame į du naujus geometrinis santykius:

$$W = V(1 + a) \operatorname{cosec} \varphi, \quad (4.1)$$

$$W = r\Omega(1 - a') \sec \varphi. \quad (4.2)$$



4.2 pav. Jungtinė momento ir menčių elementų teorija – oro srauto ir didėjančios jėgos komponentės

4.2. Matematinis sprendimas

Negalime tikėtis nustatyti MT sujungę formules (2.7) ir (2.14) ir BE iš formulių (3.9) ir (6.10). Geriausiu atveju turėsime tiek formulių, kiek nežinomųjų – šešias. Momento teorija įtraukia kintamuosius dt , a , dq , a' ; iš formulių (4.1) ir (4.2) naudoja dar du kintamuosius φ ir W . Dabar viską reikia suskaičiuoti.

Yra šeši kintamieji, kartu su apibrėžimu $x \equiv \frac{r}{R}$, $J \equiv \frac{V}{nd}$ ir vietinio sraigto vientisumu

$$\sigma(r) = \frac{Bc(r)}{2\pi r} \quad (4.3)$$

gauname pagrindinę propelerio formulę:

$$J = \frac{\pi x (4F \sin^2 \varphi - \lambda_T \sigma)}{(4F \sin \varphi \cos \varphi + \lambda_P \sigma)}, \quad (4.4)$$

čia *Prandtl*io momentas netenka reikšmės F , funkcija susijusių mentelių padėties x ir oro srauto kampo φ , pataiso abu menčių B baigtinius skaičius ir propelerio mentės galo nuostolius. Tai sudaro daugianarį apibrėžimą:

$$F \equiv \frac{2}{\pi} \cos^{-1} e^{-f},$$

$$f \equiv \frac{B(1/x - 1)}{2 \sin \varphi_t}, \quad (4.5)$$

čia oro srautas į mentelės galą φ_t , gaunamas iš:

$$\frac{1}{\sin \varphi_t} = \sqrt{1 + \frac{1}{x^2 \tan^2 \varphi}}. \quad (4.6)$$

2 pavyzdys. Rasti sprendimą $AOA\alpha$ (turimas kampas φ), kai duota propelerio geometrija ir aerodinamika, kai duota J ir reliatyvi padėtis x . Sprendimo žingsniai:

- 1) pasirinkti kampą $AOA \alpha$;
- 2) apskaičiuoti $\varphi = \beta - \alpha$;
- 3) apskaičiuoti $F = F(x, \varphi)$;
- 4) apskaičiuoti $C_l(\alpha)$ ir $C_d(\alpha)$;
- 5) apskaičiuoti λ_T ir λ_P ;
- 6) apskaičiuoti vientisumą σ ;
- 7) apskaičiuoti RHS iš formulės (4.4).

Jei gauname reikiamą (norimą) J , tai viskas gerai; jei ne – skaičiavimus atliekame pasirinkę kitą kampo α reikšmę. Kaip pavyzdį, remdamiesi elementarios mentės teorija, panagrinėkime *McCauley 7557* sraig tą, kurio $J = 0,6$, $x = 0,8$.

1. *Pasirenkame bandomąją atakos kampą α*

Tarkime, $\alpha = 3,502$ (gauta pagal paprastos mentės elemento teoriją);

2. *Reliatyvaus srauto kryptis*

Mentės kampas $\beta(0,8) = 16,929$. Tada kampas $\varphi = \beta - \alpha = 13,427$;

3. *Skaičiuojame Prandtlio papildomų nuostolių koeficientą f* , čia lygų 1,0661

Prandtlio nuostolių koeficientas $F = 0,7762$;

4. *Keliamosios ir pasipriešinimo jėgų koeficientai*

Apytikslis keliamosios jėgos koeficientas c_l , kai $\alpha = 3,502$, yra 0,7852, $c_l - 0,7715$, o $c_d - 0,0150$;

5. Sukurtos traukos ir galios koeficientai

Pagal 6.34 formulę $\lambda_T = 0,7469$ ir $\lambda_p = 0,1937$. Tai esminiai paprastos mentės elementų teorijos skaičiavimai;

6. *Vientisumo skaičiavimai (neturi kisti naudojant iteracijas, nebent jei kinta reliatyvūs taškas)*

Čia $B = 2$ (menčių skaičius), $d = 75$ coliai = 6,25 pėdos (sraigto diametras). Mentės styga x taške – $c(0,8) = 4,512$ colio. Mentės padėtis $r = 0,8 \times 75/2 = 30$ colių. Pagal 6.42 formulę mentės vientisumas $\sigma = 0,04787$;

7. Patikrinimo rezultatai

Pagal (4.4) formulę nustatome, kad $J = 0,46556$ ir kad ši reikšmė smarkiai skiriasi nuo mūsų norimos $J = 0,6$ reikšmės.

Pakartodami prieš tai aptartą procesą nustatome, kad teisinga atakos kampo reikšmė $\alpha = 1,478$, kuriai esant gauname reikiamą J reikšmę. Tai patikriname naudodami ašinės interferencijos koeficiento formules esamoms x ir J reikšmėms nustatyti. Taip pat nustatome radialinės interferencijos koeficientą. Gauname, kad kai x , esant dydžiui J , sraigto vietinis ašinis greitis apie 15 proc. didesnis nei lėktuvo ir 1 proc. mažesnis nei sraigto kampinis greitis. Taip pagal formules nustatome sraigto traukos ir galios koeficientus (atitinkamai 0,1121 ir 0,0826).

Kitas žingsnis – pakartoti šią procedūrą kitiems pasirinkties reliatyviems sraigto taškams, pradedant $x = 0,5$ ir baigiant $x = 0,95$. Skaičiavimai atliekami $\Delta x = 0,05$ intervalu (traukos ir galios koeficientas yra lygūs 0 ties $x = 1$). Naudojant specializuotą kompiuterinę programą (*backsolver ar SolveFor facility*) šį skaičiavimų procesą galima palengvinti.

Tada laipsniškai integruojant traukos ir galios koeficientus galima nustatyti C_p ir C_T reikšmes. Integruojame pagal formulę

$$C(J) = \int_{0,15}^1 \frac{dC}{dx} dx. \quad (4.7)$$

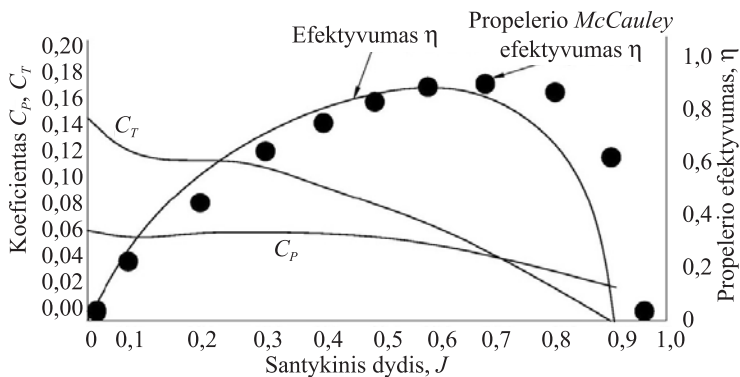
Pagal 1.9 formulę nustatome šio sraigto $C_p(0,6) = 0,0369$, $C_T(0,6) = 0,0499$ ir naudingumo koeficientą $\eta(0,6) = 0,8114$. 4.3 pa-

veiksle vaizduojamos dviejų menčių sraigto *McCauley 7557* savybės pagal jungtinę momentų ir mentės elementų teoriją, naudojant *Norriso* ir *Bauerio RAF6* keliamosios ir pasipriešinimo jėgos koeficientus.

Tai geriausia teorija, tačiau kiek ji gera ir kiek tikslios gautos dydžių reikšmės, bandysime nustatyti nagrinėdami atvejį, kai lėktuvas nejuda į priekį.

4.3. Statinė trauka

Statinės traukos atveju, kai lėktuvas yra prieš pat kilimą, yra išimtis. Visos prieš tai buvusios lygtys nepadės, nes neįmanoma nustatyti ašinės interferencijos koeficiento, kai $V = 0$. Bandymas atlikti greitas ir nekorektiškas pataisas nerezultatyvus.



4.3 pav. Propelerio charakteristikos pagal jungtinę momento ir mentelių elementų teoriją

Geriausias būdas tai atlikti – viską išvesti remiantis grafikais ir laikant, kad $V = 0$. Remiantis pagrindine priklausomybe (4.4) gaunama pagrindinė statikos lygtis:

$$4F \sin^2 \varphi - \lambda_T \delta = 0. \quad (4.8)$$

Šią lygtį išvedė mokslininkas *Glauertas*, bet joje neatsispaudė *Prandtl*io nuostolių koeficientas. Atsižvelgiant į tai galima teigti, kad 4.8 lygties rezultatai labai nutolsta nuo J reikšmės, kuri turi būti lygi 0 pagal „pagrindinę sraigto lygtį“ (4.4). Alternatyvus priartėjimas

mo būdas – tai gauti naujas ašinio greičio v , traukos ir galios lygtis. Atsižvelgiant į pagrindines taisykles, nereikalinga jokia speciali skaičiavimo įranga ar metodika. Sprendžiant nestatines lygtis ir naudojant tą pačią baigtinę J reikšmę nustatomi tokie patys traukos ir galios koeficientai kaip ir sprendžiant statines lygtis, kai $J = 0$.

4.4. Klaidos ir nesutapimai

Atsižvelgiant į skaičiavimo rezultatus galima formuluoti klausimo ir atsakymo pobūdžio teiginius.

Klausimas: Kokius rezultatus gavome?

Atsakymas: Tikrai teisingus.

Klausimas: Kodėl?

Atsakymas: Nes atkreipėme dėmesį į kai kuriuos svarbius veiksnius ir jų poveikį.

Klausimas: Ką galime pasakyti apie tai?

Atsakymas: Daugiau dėmesio skirkime smulkmenoms.

Toliau pateikiami kai kurie veiksniai, kurių nepaisymas lemia klaidas. Jie pateikiami kaip paprasti pavyzdžiai ir priežastys, kas juos lemia. Skaitinės reikšmės yra apytikrės, nes jas lemia konkrečios lėktuvo ir sraigto savybės.

1. Pratekančio srauto greitis yra didesnis nei tikrasis greitis oro atžvilgiu, veikiamas sklandmens pasipriešinimo

Tai sumažina naudingą trauką ir sraigto naudingumą apie 5 proc. Skaičiuojant laikyta, kad efektyvumas siekia 0,95. Norint tikslių rezultatų, reiktų įvertinti sklandmens dalių sukuriamą pasipriešinimą.

2. Fiuzeliažas sumažina naudingą laisvo srauto greitį V

Toje sraigto disko ploto vietoje sumažėja J reikšmė vidutiniškai apie 8,5 proc. nuo nominaliosios. Tai reiškia, kad skaičiavimams, kai laikoma, kad $J = 1$, reikia taikyti eksperimentinę J reikšmę 1,093 (nes 91,5 proc. nuo 1,093 yra 1). Padidinus 9,3 proc. absisės reikšmę, apskaičiuotų charakteristikų kreivės pasislinks dešiniau, tačiau pradinė J reikšmė bus 0. Tiksliau sakant, sulėtėjimo koeficientas priklauso nuo taško r padėties ir gali kisti kintant fiuzeliažo kontūrai. Visa ši analizė

užgožia pastangas nustatyti J – vienintelį nepriklausomą kintamąjį, nuo kurio priklauso sraigto savybės. Atsižvelgiant į nagrinėjamą greitį, oro srauto greitį V ir atskirai propelerio greitį n , pagerinti sraigto savybes – didelis, tačiau įmanomas darbas.

3. *Neaiškūs keliamosios jėgos ir pasipriešinimo jėgos koeficientai*

4. *Sraigto stebulės pasipriešinimas mažina sraigto trauką*

Skaičiuojant priimtina, kad stebulės pasipriešinimo koeficientas $C_D = 1,11$ (toks pat kaip plokštelės), o aptako – 0,35. Skaičiuojant laikoma, kad greitis toje vietoje yra truputį mažesnis nei pusė nominalaus orlaivio skridimo greičio.

5. *Sraigto mentės susukimas – apkraunant sraigą didėja mentės susukimo kampas*

Jei stabdymo jėga, tenkanti vienai sraigto mentei, mažesnė nei 100 ag – tai šio efekto galima nepaisyti. Jei santykis didesnis, reikia perskaičiuoti sraigto savybes, įvertinant menčių sukimo kampą pagal formulę:

$$\Delta\beta = \frac{bhp}{100B} - 1. \quad (4.9)$$

Visų menčių kampas padidės pusę laipsnio, jei atliksime dvimenčio sraigto, kurį tiesiogiai suka 300 ag. variklis, skaičiavimus. Jeigu yra reduktorius, šis reiškinys mažėja didėjant sraigto ir variklio sūkių per minutę santykiui.

6. *Mažai cilindrų turinčių stūmoklinių vidaus degimo variklių sūkių pulsavimai lemia nepastovų (sujauktą) oro srautą*

7. *Iškilūs mentės kontūrai šaknyje (prie stebulės) mažina keliamosios jėgos koeficientą*

Koeficientas tampa lygus viršutiniam keliamosios jėgos koeficientui, sumažintam trimis šakninio mentės storio ir stygos santykiais:

$$c_l^{Total} = c_l^{Upper} - \frac{3t_{Lower}}{c}. \quad (4.10)$$

8. *Esant 0,85 M oro spūdimas sukelia triukšmą ir mažina sraigto efektyvumą*

Daugelis aerodinamikos specialistų tyrinėja šiuos reiškinius.

9. *Sūkurių atotrūkis didina galios koeficientą*

Tipiniu atveju atotrūkis siekia 1 proc. ploto vieneto. Tai didina galios koeficientą taip pat apie 1 proc.

10. *Jei sraigto veleno ašis nėra lygiagreči fuželižo simetrijos ašiai, mentės apkraunamos nevienodai*

Tai neturi didelės įtakos sraigto efektyvumui.

11. *Keičiantis mentės stygai ir oro srauto greičiui pasireiškia Reinoldso skaičiaus efektas*

12. *Kitais greičių režimais išvengiama propelerių teorijos tezių išvengiama ventiliatoriaus, vėjo jėgainės atvejais.*

13. *Viršūnės forma turi mažą poveikį sraigto efektyvumui*

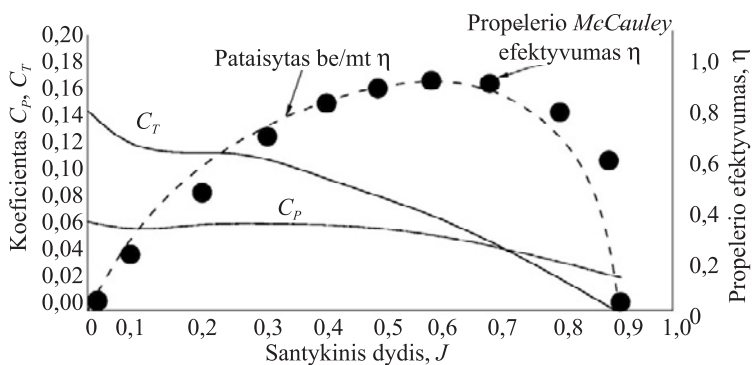
Tik sparnų atveju stačiakampė yra bloga.

14. *Teigiama, kad mentės yra nepriklausomos viena nuo kitos – tai nėra visiškai tiesa*

Sraigtas iš esmės – tai besisukantis sparnas, turintis baigtinę padėtį, kurioje kertasi srautas.

15 *Kadangi sraigtas oro srautą stumia, srauto pasipriešinimo jėga sraigto veikia iš priekio*

Atsižvelgiant į 1, 2 ir 9 pastabas, 6.16 grafikas modifikuotas ir pateikiamas 6.17 paveiksle.



4.4 pav. Propelerio charakteristikos (kaip 4.3 pav.) su pataisomis pagal 1, 2, 9 punktus (žr. tekstą)

Anksčiau pateikti teiginiai tarsi nuteikia, kad neužtektų viso gyvenimo bandant nagrinėti propelerių teoriją. Ypač kai vienas propeleris naudojamas keliems skirtingiems lėktuvams. *Orville'as Wrightas* rašė: *Ten daug kas vyksta. Propeleris kartais neatitinka teorijos. Mes galime jį imti kaip subjektą, kuris turi labai didelę įtaką mūsų lėktuvo savybėms. Norint ką nors sužinoti apie propelerį ir jo koeficientus, reikia naudoti sudėtingus skaičiavimus. Mes padarysime ką nors panašaus į propelerio poliare.*

3 pavyzdys. Panagrinėkime uždavinį, kai žinome sūkių per minutę kritimą, greičio kritimą, kai prasideda kilimas, esant nuolatiniams „gagams“, ir išeinama iš kruizinio aukščio ribų. Čia reikia paaiškinti variklio greičio sumažėjimą remiantis oro srauto greičiu. Prireiks tik 3 dalių:

- 1) C_p reikšmės (4.9 formulė);
- 2) J reikšmės V/nd ;
- 3) prielaidos, kad darbinio režimu $C_p(J)$ grafikas nuožulniai mažėja į dešinę. $dC_p/dJ < 0$.

Esant nuolatiniam kuro slėgiui sukimo momentas nekinta. Pagal 1 teiginį ir galios bei sukimo momento (1.5 formulė) ryšį konstanta K nustatoma iš priklausomybės $C_p = K/n^2$. Dabar oro greitis V sumažėja arba ima mažėti variklio sūkliai n . Jei teigiame, kad n mažėja, negalime teigti, kad J kinta. Pabandykime teigti, kad n didėja arba lieka pastovus. Tada pagal 2 punktą V mažėja, n didėja arba lieka pastovus, o J mažėja. O pagal 3 punktą C_p didėja. Bet $n^2 = K/C_p$, vadinasi, n mažėja. Galutinis rezultatas absurdiškas – n didėjant n mažėja. Taigi teisinga būtų, jeigu V mažėjant, esant pastoviam sukimo momentui, mažėtų ir n .

Skaičiuojant diferencialus gauta teorija:

$$\frac{dn}{dV} = \left[d \left(J - \frac{2C_p}{C'_p} \right) \right]^{-1}. \quad (4.11)$$

Čia C'_p yra dC_p/dJ . Neigiamo C'_p faktas užtikrina teigiamą dn/dV .

4.5. Propelerio poliarė

Propelerio poliarė – tai diagrama, C_T / J^2 , kuri vaizduojama kaip C_P / J^2 funkcija. Kas gali turėti įtakos šiam grafikui? Panagrinėkime naujus kintamuosius.

$$\frac{C_P}{J^2} = \frac{P}{n} \times \frac{1}{d^3 \rho V^2}. \quad (4.12)$$

Ši priklausomybė rodo, kaip propelerio poliarę veikia variklio sukimosi momentas, oro tankis tam tikrame aukštyje ir tikrasis orinis greitis. Variklio sukimo momentas yra beveik tiesinė kuro slėgio kolektoriuje funkcija. Esant pastoviems „gazams“ pastoviam aukštyje poliarė priklauso nuo orinio greičio. Pasirinkdamas tam tikrą greitį, pilotas iš karto pasirenka ir poliarę. Pažiūrėkime, nuo ko dar priklauso kitimas:

$$\frac{C_T}{J^2} = \frac{T}{\rho d^2 V^2}. \quad (4.13)$$

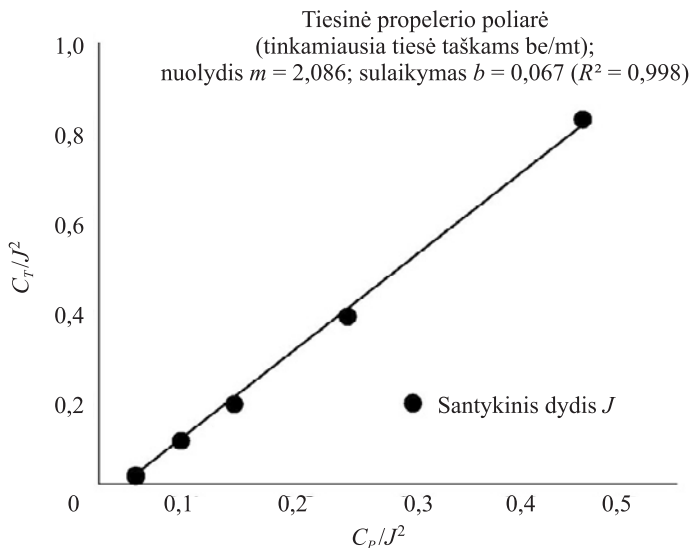
Čia svarbu, kad tai priklauso nuo traukos ir greičio, o variklio sūkių skaičius per minutę neturi reikšmės. Tai gerai tuo atveju, kai nežinome variklio sūkių. Variklio sūkių nežinojimas tiksliai poliarės diagramai neturi didelės įtakos. Poliarė leidžia sužinoti tiekiamo kuro („gazų“) padėtį (sukimo momentą) ir greitį esant tam tikrai traukai. Tai naudosime kaip argumentą kalbėdami apie pastovaus žingsnio sraigtus turinčių lėktuvų savybes.

Galiausiai atsižvelkime į faktą, kad lėktuvo propelerio poliarės grafikas visais skrydžio atvejais (išskyrus mažus riedėjimo greičius ir labai didelius greičius) yra tiesinis. Pvz., 5.5 pav. pavaizduota sraigto *McCauley 7557* poliarės grafikas. Šis pavyzdys pakoreguotas atsižvelgiant į momentų ir paprastos mentės teorijas. *McCauley* duomenimis, propelerio poliarė yra beveik tiesinė. Jei laikysime, kad J reikšmės yra maksimalios, tai grafike jų intervalas – nuo 0,5 iki 1,17.

Per atidėtus taškus galima brėžti jiems artimą tiesę.

$$\frac{C_T}{J^2} = m \frac{C_P}{J^2} + b. \quad (4.14)$$

Tai yra teoriniai teiginiai, kodėl propelerio poliarės funkcija yra tiesinė.



4.5 pav. Propelerio diagrama pagal patikslintus jungtinės momentų ir mentės elementų teorijos skaičiavimus

Kita panaši pavyzdinės mentės elemento teorija teigia, kad kiekvieną išilginę padėtį gali atstoti sraigto dalių vidurkis. Šia teorija daugiausia rėmėsi *Von Misesas*, nagrinėdamas sraigto ir lėktuvo savybes. Jis taip pat laikė, kad propelerio poliarė yra tiesė. *Von Misesas* nustatė, kad propelerio skersmuo ir vidutinis plotis kartu su mentėmis nusako pavyzdinės mentės elemento pasipriešinimo jėgos kampą ir koeficientą dviem skaičiais (nuolydis ir susikirtimas), lemiančiais tiesinę propelerio poliarę.

5. PROPELERIŲ RŪŠYS

Norint efektyviai išnaudoti propelerį, reikia nustatyti tinkamus žingsnių kampus. Propelerio žingsnio efektyvumas buvo išsamiai ištirtas. Istoriškai susiklostė, kad atsirado įvairių rūšių propelerių, pagrįstų žingsnių kampų taikymo metodais. Šiuolaikinės kartos orlaiviai naudoja kintamo žingsnio propelerius. Įvairių rūšių sraigtai ir jų tarpusavio panašumai aiškinami toliau.

5.1. Pastovaus žingsnio propeleris

Pastovaus žingsnio propeleriai, žingsnio kampas β turi tokią pačią kiekvienos mentės profilio konstantos reikšmę. Tai reiškia, kad β vertė yra nepriklausoma nuo propelerio radialinio atstumo, vadinasi, orlaivio greitis nekis.

Tai matyti iš (8.6) lygties, kad santykinio greičio kryptis φ priklauso nuo V , r ir apsisukimų per minutę pokyčio. Iš (8.7) lygties išeina, kad mentės atakos kampas α taip pat kistų dėl V , r ir apsisukimų per minutę. Net išlaikant abu – ir V , ir apsisukimus per minutę, nekintančius abiejuose mentės atakos kampo α dalyse, radialinė kryptis pasikeis. Tai gali padidinti arba sumažinti α reikšmę skerspjūviuose, tokiuose kaip: 1) viršijus užgesimo kampą tėkmės sritis gali atsiskirti nuo kitų dalių, 2) sumažinus pakilimo kampą žemiau nulio būtų gaminama neigjama trauka. Abi šios situacijos yra labiausiai nepageidaujamos ir jų reikia vengti tinkamai pasukus mentes. Toliau aiškinama fiksuoto propelerio žingsnio sąvoka.

5.2. Fiksuoto žingsnio propeleris

Pastovaus žingsnio ir fiksuoto žingsnio propelerių skirtumas yra labai paprastas. Fiksuoto žingsnio propeleryje, kitaip nei pastovaus žingsnio propeleryje, kampas β kinta išilgai menčių radialinei kryptčiai, t. y. $\beta = \beta(r)$. β reikšmės, esančios visose radialinėse dalyse, yra geometriškai nustatytos projektuotojo ir propelerio mentės yra nejudinamai pritvirtintos prie įvorės. Fiksuoto žingsnio propeleriai, žings-

nio kampas β kiekvienos mentės dalyje yra nustatyti atsižvelgiant į projektuojamo orlaivio greičius. Todėl pilotai negali pakeisti žingsnio kampo $\beta(r)$ skrydžio metu. Fiksuoto žingsnio propeleriuose veiksminiausia projektavimo vertė yra V ir apsisukimai per minutę, o kitų dydžių vertės ne tokios reikšmingos. Fiksuoto žingsnio propelerio žingsnis yra didžiausias (artimas $\pi/2$) netoli pagrindo ir mažiausias (netoli nulio) netoli mentės viršaus. Taip yra todėl, kad φ yra didžiausias ties pagrindu ir mažiausias ties viršumi ir tai matoma iš (8.7) lygties, kurioje žingsnis β turi būti tinkamai įtaisytas, kad atakos kampas π liktų teigiamas ir žemiau užgesimo kampo. Jei propelerio žingsnį galima reguliuoti ant žemės, tai vadinama reguliuojamo žingsnio propeleriu, kuris yra pranašesnis ir tinka konkrečioje situacijoje.

5.3. Kintamo žingsnio propeleris

Kad efektyvumas būtų didžiausias, atsižvelgiant į propelerį, 9.4 pav. parodyta, jog kiekvienam J yra suteikta skirtinga β reikšmė. Punktyrinės grafiko linijos jungia didžiausias β reikšmes. Iš to išeina, kad maksimalus propelerio efektyvumas skirtingais skrydžio greičiais ir apsisukimais per minutę galimas tik jeigu naudojamas kintamasis propelerio žingsnis. Jei propelerio kampo aukštį gali reguliuoti pilotas įvairiomis padėtimis skrydžio metu, tai vadinama kontroliuojamu arba kintamo žingsnio propeleriu. Dauguma šiuolaikinių orlaivių propelerių yra įtaisyti mechanškai kintamo žingsnio įtaisas įvorės viduje. Šis mechanizmas suka kiekvieną mentę apie savo ašį išilgai mentės ilgio ir vadinamas mentės ašies jungimusi. Žingsniai gali nuolatos kisti, kad išlaikytų propelerio maksimalų efektyvumą visais skrydžio greičiais ir apsisukimais per minutę.

5.4. Nekintančių sūkių propeleris

$C_P(J)$ ir $C_T(J)$ grafikai, arba vienas iš jų, ir $\eta/(J)$ grafikas kuo puikiau atspindi fiksuoto žingsnio propelerio savybes. Dažniausiai nurodoma, kad $\beta_{0,75}$ – mentės kampas padėtyje $x = 0,75$. Dažniausiai visi šie propeleriai skiriasi tik tuo. Skrydžio metu propelerio apsisukimai

per minutę išlaikomi pastovūs, nes paprastai stūmokliniai varikliai reikalauja atitinkamo apsisukimų per minutę greičio, kad įgytų didžiausią galią. Jie taip pat dažnai vadinami pastovaus greičio varikliais, nes jų sukimosi greitis skrydžio metu yra pastovus. Jei propelerio žingsnio kampas yra didesnis, nei reikia esamam skrydžio greičiui, reikės daugiau sukimosi momento iš variklio, negu variklis gali suteikti, todėl variklio velenas sumažins apsisukimus per minutę. Panašiai, jeigu žingsnio kampas yra per mažas arba karbiuratoriaus sklendė yra per daug atidaryta (bus paduodama daugiau kuro), propeleris nebus pajėgus absorbuoti variklio sukimosi momento ir todėl variklio apsukos pradės didėti, dėl to gali atsirasti struktūrinė žala varikliui ir sraigtui. Siekiant veiksmingai nustatyti mentės parametrus pagal visas sąlygas ir tuo pat metu išvengti per didelės galios arba nepakankamo sukimosi momento, pastovaus greičio propeleriuose įmontuojamas kintamo žingsnio prietaisas. Pastovaus greičio sraigto mentės neturi pastovaus mentės kampo nustatymo. Šių sraigto mentės automatiškai pasukamos laikantis tam tikrų ribų. Tai atlieka specialus mechanizmas, kuriame sukuriama slėgis valdant sraigto sukimosi greitį. Šis mentės žingsnio prietaisas automatiškai reaguoja, kad būtų išlaikomas pastovus sukimosi greitis, neatsižvelgiant į sklendės nustatymus. Pilotas tiesiog pasirenka norimą sukimosi greitį; vėliau propelerio mentės žingsnis nustatomas automatiškai. Taigi propelerio efektyvumas, nustatant žingsnį automatiškai, visada išlieka didžiausias, 9.4 pav. kreivėje pavaizduota punktyrinė linija, rodanti skrydžio greičio arba didesnio koeficiento pokyčius. Didžiausias propelerio efektyvumas pasiekiamas tarp 0,80 ir 0,90. Todėl jei propelerio efektyvumas nenurodytas, įprasta jį laikyti $\eta_p = 0,85$.

Pastovaus greičio sraigto reikia turėti labai daug duomenų. Jei juos turime, sraigto naudingumą η galime nustatyti taip:

- pagal V , n ir d suskaičiuojame J ;
- remdamiesi POH lentelėmis, nustatome slėgį h_p , OAT (turimą tankį aukštyje), kuro slėgį ir sūkių per minutę ir randame veleno sukuriamą galią P ;
- pagal P , ρ , n ir d randame C_p ;

- pagal C_p ir J grafiką nustatome $\beta_{0,75}$ reikšmę;
- iš η ir J grafiko pagal gautą $\beta_{0,75}$ reikšmę nustatome naudingumo koeficientą η .

Trūkumas tas, kad retai galima gauti reikiamų propelerių diagramas, grafikus. Pranašumas – kad tai gana paprastas būdas ir kad neatsižvelgiama į tai, koks yra pastovaus greičio propeleris.

5.5. Įvairios propelerio padėtys

Yra keturios svarbios ir skirtingos propelerio padėtys: darbinė padėtis, stabdymo padėtis, sukimosi padėtis ir jungimosi (fliugerio) padėtis. Darbinės padėties propeleris naudoja veleno sukurtą energiją ir tai yra orlaivio galia. Esant stabdymo būsenai (propeleris sukasi atgal), propeleris naudoja energiją iš veleno ir paverčia ją stabdymo galia (neigiama trauka), veikiančia orlaivį. Sukdamasis propeleris naudoja energiją iš vėjo ir perduoda ją velenui.

Jeigu orlaivio varikliai tampa nevaldomi, pageidautina sukti mentes prie didžiausio atakos kampo, kad būtų sumažintas pasipriešinimas. Tai vadinama jungimosi padėtimi (fliugeravimu). Ji taip pat mažina propelerio pasipriešinimą vėjui (kuris gali pakenkti nesisukančiam propeleriui), todėl ši padėtis naudojama lėktuvams stovint ant žemės.

5.6. Propelerių kūrimo tendencijos

Sukuriami vis galingesni varikliai, mažinant orlaivio masę ir didinant variklio greitį. Tai reiškia, kad propeleriai turi būti pajėgūs absorbuoti didelę veleno galią kaip ir turbosraigtinių turbininių kuro variklių. Padidinus propelerių diametrą, apsisukimus per minutę ir menčių skaičių, gali būti pasiekama didelė absorbcijos galia. Padidinus menčių skaičių, didėja įvorės diametras ir sukuriami dideli aerodinaminiai trukdžiai tarp menčių. Penkios mentės propeleryje yra laikoma didžiausiu galimu ir veiksmingu skaičiumi. Todėl naudojami priešingai besisukantys sraigtai dviejose skirtingose lygiagrečiose įvorės plokštumose. Šis menčių skaičiaus padidinimas leidžia efektyviau panaudoti veleno jėgą. Papildomas pranašumas yra tas, kad priešingai

besisukantys sraigtai panaikina sukuriuoto srauto efektą ir pusiausvyros netekusio sukimosi momentą. Priešingai besisukantis propeleris padidina svorį, sudėtingumą ir kainą.

Padidinti propelerio diametrą kartais neįmanoma dėl žemės ir orlaivio sklandmens. Spūdumo efektą lemia padidėjęs mentės ilgis ar apsisukimų skaičius per minutę ir padidėjęs menčių viršūnės greitis. Jis sumažinamas suteikiant strėlines propelerio mentes. Tai sumažina bangos stabdymą panašiai kaip ir strėliniu sparnu. Gaubtinio arba vamzdinio propelerio koncepcija taip pat naudojama propelerio sistemos veiksmingumui padidinti.

6. BENDRI PROPELERIŲ GRAFIKAI

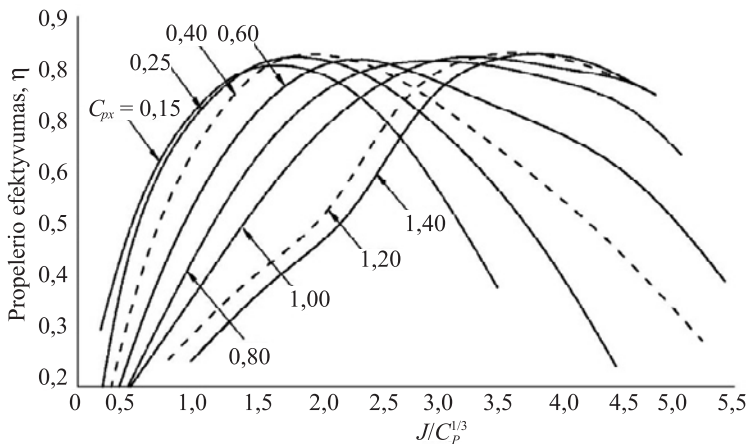
Momentų teorija teigia, kad idealų sraigto efektyvumą atspindi funkcijos $J/C_p^{1/3}$ grafikas. Tačiau, atsižvelgiant į mentės pasipriešinimą, žalingą interferenciją ir srauto užsisukimą, tai daug sudėtingiau. To būtų gana, tačiau reikia įvertinti, kiek didelis yra C_p . Itakos turi ne tik C_p , bet ir galios pasiskirstymo koeficientas X , taip pat propelerio menčių plotis. Pirmoji į tai atsižvelgė ir pradėjo naudoti bendrus propelerių grafikus „Boeing“ bendrovė, kurdama bombonešius Antrojo pasaulinio karo metais.

Tačiau tokie skirtumai kaip, pavyzdžiui, tarp *Bonanza* (285 ag) ir *Pratt & Whitney Wasp Majors* (2685 ag), buvo akivaizdūs. *Boeing* bendrieji propelerių grafikai negalėjo būti efektyviai pritaikomi bendrojoje aviacijoje, kur buvo naudojami pastovaus greičio propeleriai. Dėl to prireikė naujų propelerių charakteristikų diagramų, pritaikytų mažajai aviacijai. Bendrosios aviacijos propelerių tyrimai leido sukurti grafiką (6.1 pav.). Šis grafikas –pagrindinė pastovaus greičio propelerių taisyklė. Panagrinėkime, kaip ji veikia:

4 pavyzdys. Variklio sūkiai 2400 aps./min. (40 aps./s), išvystoma galia 200 hp (110,000 ft-lbf/s). Skrendama 5 000 pėdų aukštyje ($\sigma = 0,8617$, $\rho = 0,002048$ slug/ft³) 150 mazgų greičiu (235,2 ft/s). Sraigto skersmuo $d = 7$ ft (pėdos).

Pagal tai $J = \frac{V}{nd} = 0,9043$; tada $C_p = \frac{P}{\rho n^3 d^5} = 0,04993$; atitinkamai $C_p^{1/3} = 0,36824$ ir $\frac{J}{C_p^{1/3}} = 2,456$.

Bendrosios aviacijos bendrosios propelerių naudingumo kreivės yra $C_{px} = \frac{C_p}{X}$, čia X yra galios koeficientas, nuo kurio priklauso pilnasis propelerio veiksnio koeficientas (TAF). Tarkime, mentės efektyvumas (veiksnumas) (BAF) yra 100 proc. Mūsų sraigtus turi 2 mentės, todėl TAF bus lygus 200. Taigi $X = 0,246$. Atitinkamai $C_{px} = 0,2030$; gauta reikšmė yra viduryje tarp $C_{px} = 0,15$ ir $C_{px} = 0,25$. Nustatome naudingumo koeficientą $\eta = 0,764$ (pagal *Boeing* būtų 0,87).



6.1 pav. Bendrosios aviacijos bendrosios propelerių kreivės

Toliau panagrinėsime *BAF* – mentės aktyvumo koeficientą, pilnąjį propelerio menčių aktyvumo koeficientą ir dar vieną parametą, į kurį nebuvo atsižvelgta.

6.1. Mentės aktyvumo koeficientas

Propelerio sekcijos, kurios padėtis x , tangentinis oro srauto greitis yra proporcingas x . Aerodinaminės jėgos toje srityje yra statmenos greičiui, iš to išeina, kad $x^2 c(x) dx$. Absorbuota galia turi įtaką greičiui, todėl $x^3 c(x) dx$. Todėl *BAF* yra:

$$BAF \equiv \frac{100,000}{32} \times \int_{0,2}^1 x^3 \frac{c(x)}{R} dx. \quad (6.1)$$

Čia R – mentės spindulys. Koeficientas prieš integralą – santykis reikiamam *BAF* pavidalui gauti. Dažniausiai įprastinės menčių formos *BAF* kinta nuo 70 iki 140. Pilnasis propelerio menčių aktyvumo koeficientas tada yra:

$$TAF = k \times BAF. \quad (6.2)$$

Čia k – menčių skaičius.

Formulės mentės ploiui apskaičiuoti neturime. Reliatyvios padėties funkcija $c(x)$ yra įvertinama formule 6.1. Padeda 6.1 lentelė ir

6.2 formulė. Pirmiausia turime susiskirstyti propelerio mentės ilgį į vienodas dalis ir išmatuoti mentės plotį atkarpose, pradedant nuo 0,2 ir einant 0,05 žingsniu iki 1. Pradedama nuo 0,2, nes iki tol mentę dengia aptakas, plotis lygus 0.

Toliau naudojame taisyklę:

$$BAF = \frac{78,125}{R} \times \{f(0,2) + 2[f(0,25) + f(0,30) + \dots + f(0,95)] + f(1,00)\}. \quad (6.3)$$

Funkcijos $f(x)$ reikšmės yra nurodytos BAF charakteristikose ir yra x^3 ir $c(x)$ rezultatai.

6.2. Galios keitimo koeficientas X

Sraigto galios keitimo koeficientas X priklauso nuo pilnojo propelerio aktyvumo pagal formulę ir pavaizduotas 6.2 pav.

$$X = 0,001515TAF - 0,088. \quad (6.4)$$

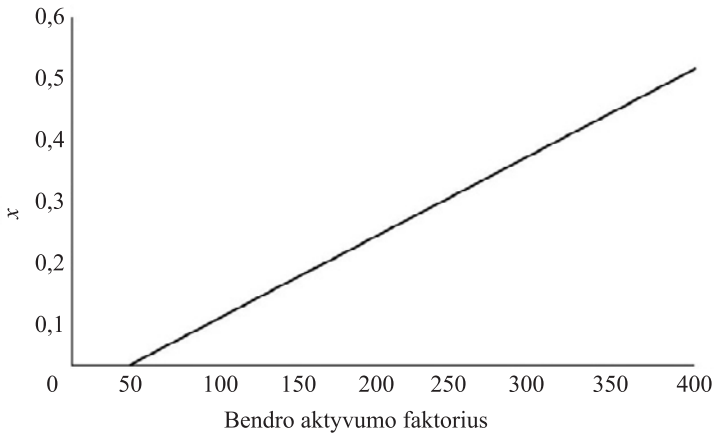
IC160 McCauley sraigtui, naudojamam *Cessna 172* lėktuvuose, $BAF = 87,15$, $TAF = 174,30$, o $X = 0,1761$. Jis padalintas iš C_p siekiant gauti C_{px} . C_{px} reikšmė rodo, kuriuo bendrosios aviacijos bendruoju propelerių grafiku remtis.

6.1 lentelė. Mentės aktyvumo koeficiento duomenų lentelė

Propelerio gamintojas ir modelis		Menčių skaičius	Propelerio diametras
BAF		TAF	Pastabos
pjūvis x	x^3	mentės storis c	$f(x) = x^3 \times c$
0,20	0,0080		
0,25	0,0153		
0,30	0,0270		
0,35	0,0429		
0,40	0,0640		
0,45	0,0911		
0,50	0,1250		

6.1 lentelės pabaiga

0,55	0,1664		
0,60	0,2160		
0,65	0,2746		
0,70	0,3130		
0,75	0,4219		
0,80	0,5120		
0,85	0,6141		
0,90	0,7290		
0,95	0,8574		
1,00	1,0000		



6.2 pav. Nekintančių sūkių propelerio galios reguliavimo veiksnys

6.3. SDEF

Pagrindinis propelerio korekcijos koeficientas reikalingas tam, kad į sraigą atitekančio oro srauto greitis yra daug mažesnis nei lėktuvo skrydimo greitis. Fiuzeliažas ir kiti elementai (aptakas, stebulė) sujaukia aptekantį oro srautą. Gilinant nustatoma, kad šis efektas priklauso nuo fiuzeliažo formos bei oro srauto greičio ir gali būti nustatomas pasitelkiant koeficientą Z – fiuzeliažo ir propelerio skersmens santykį. Fiuzeliažo skersmuo turi būti matuojamas tokiu pat

atstumu nuo sraigto pradžios, koks yra sraigto skersmuo. Taikysime tyrimų metu sudarytus grafikus.

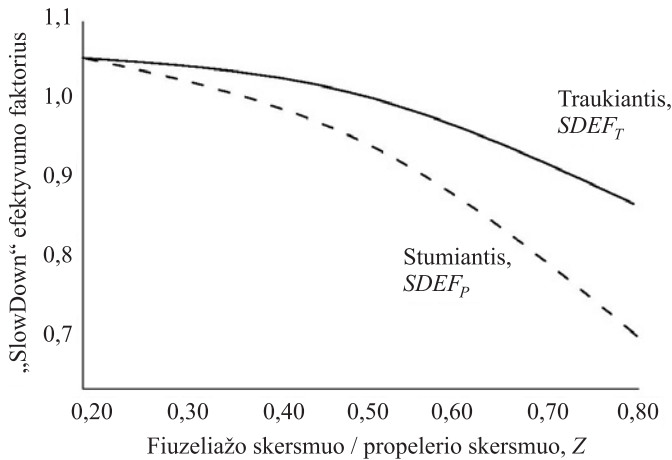
Taigi traukiančio sraigto SDEF yra:

$$SDEF_T = 1,05263 - 0,00722Z - 0,16462Z^2 - 0,18341Z^3. \quad (6.5)$$

Ir stumiančio sraigto:

$$SDEF_P = 1,05263 - 0,041852Z - 0,1481Z^2 - 0,62001Z^3. \quad (6.6)$$

Šiose formulėse pažymėtina, kad pirmieji nariai yra vienodi, nes duomenys imti iš pagrindinių bendrosios aviacijos propelerių grafiko. Traukiančiojo sraigto $SDEF_T$ siekia nuo 0,85 iki 0,95. Gerai yra laikoma 0,92 ir kai 8 proc. sumažinama fiuzeliažo įtaka oro srautui. Stumiantiems sraigtams fiuzeliažas turi didesnę įtaką, todėl jų $SDEF$ yra mažesnis nei traukiančiojo.



6.3 pav. SDEF nekintančių sūkių propeleriui

Ir galiausiai sraigto efektyvumas:

$$\eta = SDEF(Z) \times \eta \left(\frac{J}{C_p^{1/3}}, C_{px} \right). \quad (6.7)$$

7. PROPELERIO PARINKIMAS

Renkantis propelerį svarbus yra jo skersmuo, žingsnis bei standumas. Šių savybių pasirinkimas gali nulemti aerodinaminį naudingumą. Pavyzdžiui, siekdami sumažinti propelerio keliamą triukšmą turėtume naudoti plačias mentes, kurių galų greitis mažas. Kitas pavyzdys – propelerio skersmuo kartais gali būti ribojamas dėl jo atstumo nuo žemės ribojimo arba dėl atstumo tarp atviros kabinos ir fiuzeliažo. Propelerio charakteristikos priklauso nuo variklio. Propelerio mentės dažnis neturi priklausyti nuo variklio dažnio. Aerodinamiškai siekiama parinkti propelerį, kuris būtų naudingas ir esant kreiseriniam režimui, ir pakilimo metu, kai veikia didelė statinė trauka. Šie reikalavimai nesunkiai patenkinami, kai propeleris yra keičiamo žingsnio. Fiksuoto žingsnio propeleriams ieškoma kompromiso tarp šių dviejų režimų.

Pagal duotus propelerio testo rezultatus, pateiktus 11.3, 11.4 pav., galime parinkti geriausią propelerio skersmenį bei menčių kampą, apskaičiuotą pagal orlaivio ir variklio derinį. Kartais naudojamas kaip pagrindas greičio jėgos koeficientas C_s . Jis apskaičiuojamas:

$$C_s = \left(\frac{\rho V^5}{P n^2} \right)^{1/5}. \quad (7.1)$$

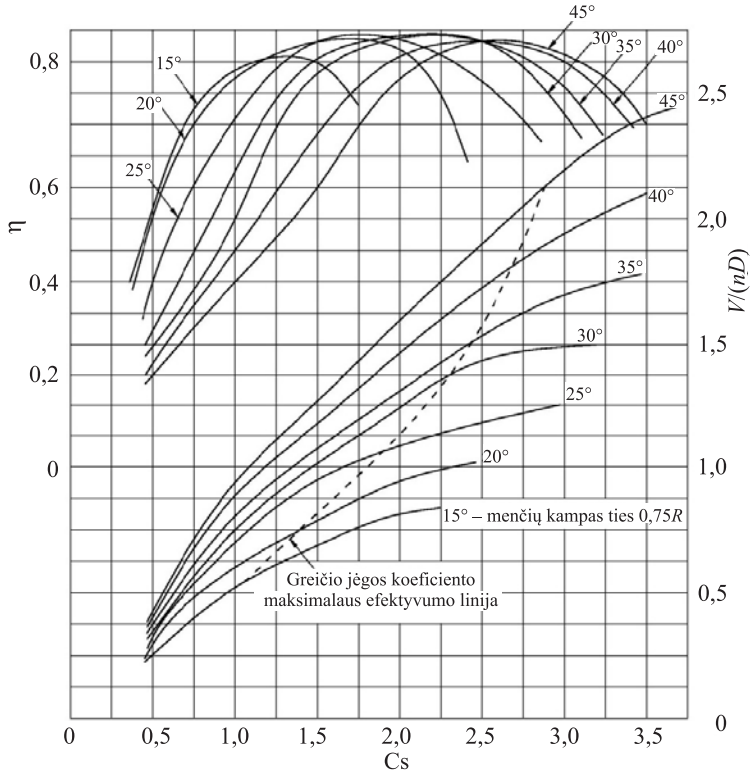
Kai žinome C_p , funkciją nuo J , tuomet C_s galime apskaičiuoti:

$$C_s = \frac{J}{C_p^{1/5}}. \quad (7.2)$$

Paveikslėlyje 7.1 pateikta J funkcija nuo C_s , tokiam pačiam propelerui kaip ir 11.3 bei 11.4 pav. 7.1 pav. taip pat pateikta maksimalaus naudingumo linija. Sunkiau bus parinkti optimalų propelerio skersmenį, jei jį naudosime *Cherokee* 180 orlaivyje. Laikome, kad parinktas propeleris sunaudos 75 proc. maksimalios galios, kai bus 2500 aps./min. ir 180 bhp (standartiniu jūros lygiu). Kai f reikšmė – 0,5 m², e – 0,6, C_D galime apskaičiuoti kaip V funkciją. Tuomet C_T ir C_D susiję su T , kuris lygus D .

$$C_T = C_D \frac{SJ^2}{2D^2}. \quad (7.3)$$

Tarkime, kad V lygus 130 mph (mylios per valandą), CS lygus 1,36. Pagal 7.1 paveikslėlyje pateiktą maksimalaus naudingumo liniją nustatome, kad J lygus 0,76, o kampas β siekia 20° . Grįžtant prie pavyzdžio C_T reikšmė 0,0573, taigi aišku, jog 130 mph nebus optimalaus propelerio (prie šios galios bei apsisukimų) trimerinis greitis.



7.1 pav. Propelerio diagrama remiantis 11.2 pav.

Iteracijų metodu trimerinis greitis siekia 132 mph, tuomet:

$$J = 0,76,$$

$$\beta = 20^\circ,$$

$$C_T = 0,0592,$$

$$\eta = 0,84,$$

$$D = 6,1 \text{ ft.}$$

8. NAUJO PROPELERIO KŪRIMAS

Svarbiausia kuriant propelerį yra jo aerodinaminės charakteristikos. Optimali menčių apkrova aprašoma remiantis Betz sąlygomis, būdingomis sukurių sistemai, besidriekiančiai per visą paviršių. Ši sąlyga naudojama, jei:

$$wr \tan(\varphi + \alpha_i) = \text{const} \tan t = V + w_0, \quad (8.1)$$

w_0 yra fiktyvus greitis, vadinamas smūginiu (*impact*) greičiu. Esamas rekomenduojamas santykis w_0 / wR gali būti parinktas atsitiktinai. Remdamiesi 6.10b pav. pateikta geometrija, nustatome:

$$\frac{w_t}{V_T} = \frac{w_0}{V_T} \sin(\varphi + \alpha_i) \cos(\varphi + \alpha_i). \quad (8.2)$$

Čia:

$$\varphi + \alpha_i = \tan^{-1} \left(\frac{V + w_0}{x V_T} \right). \quad (8.3)$$

8.2 formulę pakeitę į 4.3, gauname σC_1 kaip x funkciją. Reikia nuspręsti, kaip pasirinkti tarp σ ir C_1 . Ši procedūra nėra lengva. Pirmiausia turi būti parenkamas menčių skaičius. Jos parenkamos eksperimento arba iteracijų metodais. Tuomet, remiantis skaičiavimais, parenkamas mentės storis.

Siekiant išvengti propelerio menčių briaunų įtrūkimų ar įbrėžimų, svarbu atsakingai pasirinkti tinkamą mentės profilį. 8.1 pav. pateikti du profiliai. Simetrinį profilį (kairėje) veikiantys lenkimas ir nuovargis yra tiesiogiai proporcingi atstumui nuo neutralios ašies. Žingsniai pasirenkant NASA serijos 16 profilį:

1. pasirinkti C_l ;
2. apskaičiuoti c iš σC_l ;
3. nustatyti M_{cr} iš t/c ir C_l ;
4. palyginti M_{cr} su M atstojamąja;
5. kai M_{cr} mažiau už M , sumažiname C_l ir viską perskaičiuojame.

Jeigu projektavimo metu neaptariamas Macho skaičius, C_{li} imamas toks, kad pasirinkto profilio C_l ir C_d santykis būtų mažiausias.

Nustatę C ir C_l , apskaičiuojame C_d reikšmes. C_d reikšmės kartu su $(\varphi + \alpha_i)$ įrašomos į 3.14 a ir 3.14 b formules, siekiant nustatyti trauką ir galią. Norint nustatyti reikiamas C_T ir C_p reikšmes, keičiamos w_0 reikšmės. Paprastai didinat w_0 reikšmę, padidėja bet kuris iš šių koeficientų.

Dauguma propelerių kuriami fiuzeliažo priekyje. Šiuo atveju įtekėjimo greitis nėra konstanta, o x (kuris yra bedimensis dydis) funkcija. Šis tridimensis srovės laukas grindžiamas potencialios srovės metodu. Jei $V-x$ funkcija, tai srovės kampas φ :

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{V(x)}{wr} \quad (8.4)$$

arba

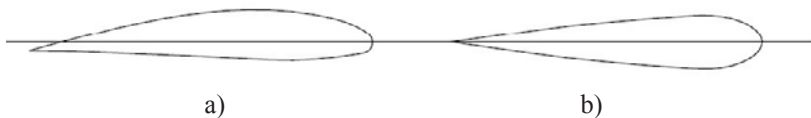
$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{V(x)/V_0}{x} \frac{J}{\pi} \right). \quad (8.5)$$

Potencinis įtekėjimas pagal Betz sąlygas nėra:

$$V(x) + w_0 = \text{cons} \tan t.$$

Vietoj to:

$$w_0 = \text{cons} \tan t. \quad (8.6)$$



8.1 pav. Simetrinis ir nesimetrinis mentės profilis

8.6 formulėje potencinis srautas perkeliamas nuo propelerio fiuzeliažui. $V(x)$ priartėja prie V_0 , o w_0 priartėja – $2w_0$, taigi Betz sąlyga yra patenkinama.

8.1. Santykinis greitis ir jo kryptis

Orlaiviui skrendant, kiekviena mentės dalis tuo pačiu metu patiria du skirtingus greičius, kurie paprastai yra statmeni vienas kitam. Vienas iš jų yra apskritiminis greitis $r\omega$, esantis sukimosi plokštumoje; čia $\omega = 2\pi N$ – menčių sukimosi kampinis greitis, kurio N yra apsisukimų skaičius per laiko vienetą. Kitas yra tiesioginis propelerio rotaci-

nio pagrindo greitis V , kuris atsiranda dėl orlaiviui judant. Kiekviena mentės dalis būna pasukta į santykinį (atstojamąjį) skridimo greitį V_R . Jis yra greičio vektorių V ir $r\omega$ suma, V_R dydį bei kryptį ϕ nustatome iš rotacinio paviršiaus:

$$V_R = \sqrt{V^2 + r^2\omega^2} \quad \text{ir} \quad \phi = \tan^{-1}\{V / (r\omega)\}. \quad (8.7)$$

Taigi ir V_R , ir ϕ priklauso nuo V , r ir ω . Apskritiminis greitis $r\omega$ gali būti padidinamas padidinant r , paslinkus link mentės viršaus, arba padidinant ω , padidinus propelerio apsisukimų skaičių per minutę. Padidėjęs apskritiminis greitis sumažina ϕ – dėl to santykinis skridimo greitis priartėja prie rotacinio paviršiaus. Panašiai, padidėjus skridimo greičiui, V_R dydis ir kryptis priartėja prie V .

Pasirinktas tiesioginis greitis V , propelerio apsisukimai per minutę, maksimalus V_R ir minimalus ϕ išgaunami propelerio mentės viršūnėje. Jie gali būti išreikšti atitinkamai:

$$V_{R.m} = V_{R.tip} = \sqrt{V^2 + R^2\omega^2} \quad \text{ir} \quad \phi_{\min} = \phi_{tip} = \tan^{-1}\{V / (R\omega)\},$$

čia R yra mentės viršaus radialinis atstumas, o sujungti m ir $\min$. nurodo atitinkamai maksimumą ir minimumą. Anksčiau minėti du ryšiai atitinkamai gali būti užrašyti taip:

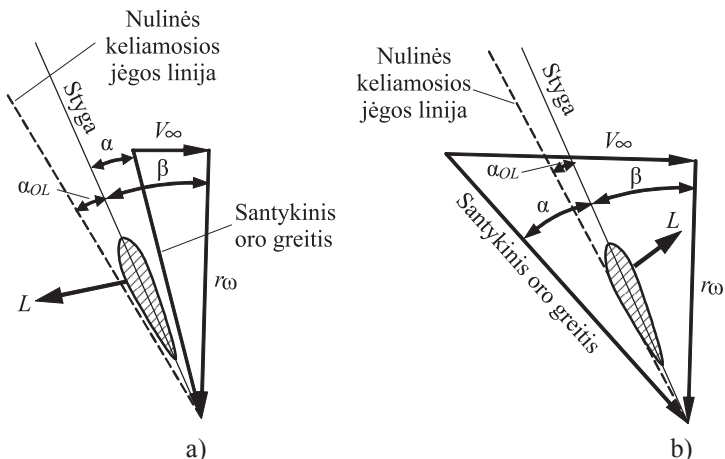
$$M_{R.m} = M_{R.tip} = M\sqrt{1 + (\pi / J)^2} \quad \text{ir} \quad \phi_{\min} = \phi_{tip} = \tan^{-1}(J / \pi),$$

čia $M_{R.m}(= V_{R.m}/a)$ ir $M(= V/a)$ yra Macho skaičiai (kūno judėjimo greičio vienetai), atitinkantys atkuriamąjį ir tiesioginį greitį, ir atitinkamai a yra vietinis garso greitis. J dydis yra vadinamas propelerio poslinkiu, kuris išreiškiamas taip: $J = V/nD$; čia $D (= 2R)$ yra propelerio diametras, kurio radiusas yra R . Propelerio poslinkis yra svarbus propelerio judėjimo parametras.

8.2. Atakos kampas

Kampas tarp V_R ir linijos, jungiančios sparno priekinį ir galinį kraštą, apibrėžiamas kaip sparno profilio arba mentės dalies atakos kampas α . Kaip matyti iš 8.2 pav., atakos kampas apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\alpha = \beta - \phi. \quad (8.8)$$



8.2 pav. Menčių profilio atakos kampai:

a) teigiamas atakos kampas ir b) neigiamas atakos kampas

Kadangi, gaminant tinkamą trauką, atakos kampas turi būti teigiamas, iš to išeina, kad β turi būti didesnis už φ . Kampas β mentės dalyje yra labai svarbus propelerio geometrinis parametras, nes jis fiksuoja mentės dalyje atakos kampą dėl pasirinktų φ arba propelerio nueito kelio J .

Jeigu V yra didesnis arba panašus į $r\omega$, kampas φ gali viršyti β , todėl atakos kampas taptų neigiamas, kaip parodyta 8.2 b pav. Esant tokiai menčių padėčiai, trauka būtų neigiama, o tai nepageidaujama. Taip nutinka netoli menčių pagrindo arba kai propeleris lėtai sukasi, esant tiesioginiam judėjimui.

8.3. Mažo ir didelio žingsnio propeleriai

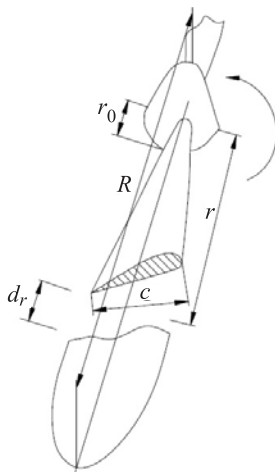
Propelerio menčių žingsnio kampas rodo, ar propeleris yra mažo ar didelio žingsnio. Jeigu žingsnio kampas β yra mažas, tai vadinama mažu žingsniu, o didelis žingsnio kampas – dideliu žingsniu. Mažo žingsnio propeleriai dažnai vadinami žemo žingsnio, o didelio žingsnio propeleriai – aukšto žingsnio propeleriais. Moderniuose, stūmoklinius propelerius turinčiuose, orlaiviuose žingsnio kampas gali būti

keičiamas netgi skrydžio metu. Kai žingsnis keičiamas nuo mažo į didelį, padidėja trauka ir dėl to padidėja orlaivio skrydžio greitis. Šia prasme žingsnis yra tarsi automobilio pavara, kai mažas žingsnis atitinka žemą pavarą, o didelis žingsnis – aukštą pavarą.

Mažu žingsniu nustatytas propeleris turi mažesnę pasipriešinimą (rotacijos paviršiuje) arba sukimosi momentą ir dėl to sukasi didesniu greičiu, leisdamas varikliui išvystyti didesnę galią. Todėl propeleris, nustatytas mažu žingsniu, leidžia orlaiviui lengviau pakilti. Didelio žingsnio propeleriai leidžia išvystyti didesnę skrydžio greitį ir aukštį.

9. PROPELERIŲ TRAUKOS IR SUKIMOSI MOMENTO SKAIČIAVIMAI

Propelerio sukimasis ore dėl slėgio skirtumų ir menčių paviršiaus ploto trinties sukelia aerodinamines jėgas. Išsklaidytos išilgai normalaus sukimosi paviršiaus šios jėgos suteikia traukos galią, dažniausiai žinomą kaip propelerio traukos galią, kuri yra atsakinga už orlaivio judėjimą pirmyn. Jeigu šių aerodinaminių jėgų momentas yra panaudojamas kiekvienoje propelerio dalyje aplink propelerio rotacijos ašį, sudaromas propelerio veleno sukimosi momentas.



9.1 pav. Propelerio mentė

Tinkamai išsklaidžius aerodinamines jėgas kiekvienoje menčių dalyje, galima teoriškai, pagrįstai tiksliai apskaičiuoti trauką ir sukimosi momentą. Iš pradžių išgaunamos jėgos mažoje mentės dalyje d_r , tada jos sujungiamos išilgai menčių ir galiausiai dauginamos iš propelerio menčių skaičiaus, kaip paaiškinta žemiau.

9.1 pav. parodyta viena propelerio mentė. l ir d žymi keliamąją ir trinties jėgas, atitinkamai per mentės ilgį radialinis atstumas r . Jeigu F_r ir Q_r yra dalinė trauka ir sukimosi momentas, atitinkamai per mentės ilgį, radialinį atstumą r , jie gali būti išreikšti:

$$F_r = l \cos \varphi - d \sin \varphi \quad (9.1)$$

ir

$$Q_r = (l \sin \varphi + d \cos \varphi) r, \quad (9.2)$$

čia (9.2) lygties skliaustų viduje yra mentės pločio jėgos vienetas, statmenas radialinei kryptčiai. Išreiškiant dalinį keliamąjį ir trinties koeficientus per mentės ilgio vienetus C_l ir C_d , atitinkamai l ir d gali būti išreikšti kaip:

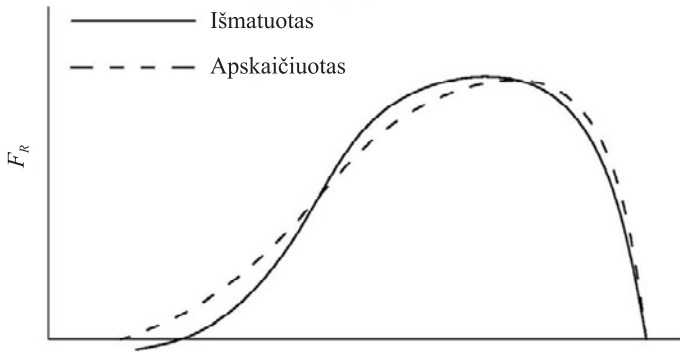
$$l = C_l p V_R^2 c / 2 \text{ ir } d = C_d p V_R^2 c / 2,$$

čia $V_R = V / \sin \varphi$. 9.1 ir 9.2 lygtys gali būti užrašomos kaip:

$$F_r = p V^2 c (C_l \cos \varphi - C_d \sin \varphi) r / (2 \sin^2 \varphi)$$

ir

$$Q_r = p V^2 c (C_l \sin \varphi - C_d \cos \varphi) r / (2 \sin^2 \varphi).$$



9.2 pav. Apskaičiuotas ir išmatuotas F_r , išilgai mentės ilgio

F_r mentės ilgio variacijos parodytos 9.2 pav. Vidinė mentės dalis, esanti arti centro, gamina labai nedaug traukos, todėl pateisinama didelės įvorės dėjimas į propelerio centrą. Erdvė, esanti įvorės viduje, gali būti išnaudojama įdiegiant žingsnio pavaros sistemą.

Absoliuti trauka F ir absoliutus sukimosi momentas Q , gaminami propelerio, atitinkamai gaunami iš:

$$F = B \int_{r_0}^R F_r dr \text{ ir } Q = B \int_{r_0}^R Q_r dr,$$

čia B – propelerio menčių skaičius, R – radialinis mentės viršūnės atstumas, o r_o – išorinis įvorės spindulys, kur įtvirtintas mentės pagrindas. Trauka ir sukimo momentas atitinkamai gali būti apskaičiuojamas taip:

$$F = B(pV^2 / 2) \int_{r_o}^R (C / \sin^2 \varphi)(C_1 \cos \varphi - C_d \sin \varphi) dr \quad (9.3)$$

ir

$$Q = B(pV^2 / 2) \int_{r_o}^R (C / \sin^2 \varphi)(C_1 \sin \varphi - C_d \cos \varphi) r dr. \quad (9.4)$$

Integralų viduje esantys dydžiai kinta ne tiesine radialine kryptimi. Dažniausiai neįmanoma analitiškai apskaičiuoti šių integralų. F ir Q reikšmė priklauso nuo C_1 ir C_d apskaičiavimo tikslumo. Daliniai keliamosios jėgos ir trinties koeficientai apskaičiuojami arba pagal mentės elementų teoriją, arba pagal sūkurių teoriją, kuri buvo suformuluota ir pritaikyta propeleriui po paprasčiausios Rankine'o-Froudo propelerio momento teorijos. Kituose dviejuose paragrafuose pateikiami pagrindiniai šios teorijos bruožai.

Froudo momentų teorija pakeičia propelerį į diską. Į oro srautą žvelgiama kaip į nespūdų ir vienmatį. Taip pat priimama, kad statinis slėgis skersai disko didėja ir greitis skersai jo kinta be kliūčių. Teorija neapibrėžia menčių formos ir nespėja menčių profilio keliamosios ir trinties jėgų. Teorija bando nuspėti tik idealią visišką trauką F ir idealų propelerio efektyvumą η_p kaip:

$$F = (\pi D^2 / 2) p(V + v)v \text{ ir } \eta_p = V / (V + v),$$

čia V yra besiartinančio netrukdomo oro greitis; kai jis pasiekia propelerio profilį, padidėja $(V + v)$. Idealus efektyvumas praktikoje yra apie 85 proc.

Propelerio mentės elementų ir sūkurių teorijos yra labiau realistiškos, nes jos svarsto ir mentės profilio geometriją, ir dalinius keliamosios jėgos bei trinties koeficientus, C_1 ir C_d , kiekvienoje radialinėje padėtyje. Mentės elementų teorijos raida labai panaši į nespūdaus ir vienalyčio oro tėkmės teoriją, kuri svarsto tik slėgio jėgą ir nepaiso paviršiaus trinties jėgos, nes yra gana maža.

Kaip bandymas, propelerio trauka, sukimo momentas ir galia gali būti tiesiogiai išmatuoti naudojant įtampos matavimo instrumentus.

Propeleris gali būti testuojamas vėjo tunelyje, sukonstruotame šiam specialiam tikslui, ir įrengtas su įvairaus greičio ir įvairios galios elektriniais motorais, kad galėtų vežti propelerį.

9.1. Propelerio parametrai

Svarbūs propeleriui būdingi bruožai yra jo koeficientas J , traukos koeficientas C_F , sukimosi momento koeficientas C_Q , galios koeficientas C_P ir propelerio efektyvumas η_p . Panašiai kaip ir daugelis kitų aerodinaminių problemų, propelerio aerodinamikos problema yra tinkamai išreikšti trauką F , sukimosi momentą W ir galią P tinkama neerdvine forma. Jeigu D yra propelerio diametras, sudarantis N sukimūsi per tam tikrą laiko vienetą, reikia imti standartinį ilgį D , standartinį plotą D^2 , standartinį greitį $N D$ ir standartinį slėgį $p (ND)^2$. Neerdviniai traukos, sukimosi momento ir galios koeficientai gali būti atitinkamai išreikšti:

$$C_F = F / \{p(ND)^2 D^2\} = F / (pN^2 D^2),$$

$$C_Q = Q / \{p(ND)^2 D^2 D\} = Q / (pN^2 D^5)$$

ir

$$C_P = P / \{p(ND)^2 D^2 ND\} = P / (pN^3 D^5).$$

Jeigu tam tikro propelerio koeficientai C_F , C_Q ir C_P yra žinomi, propelerio arba panašaus propelerio trauka, sukimosi momentas ir galia gali būti apskaičiuoti iš:

$$F = pN^2 D^4 C_F, \quad Q = pN^2 D^5 C_Q \quad \text{ir} \quad P = pN^3 D^5 C_P. \quad (9.5)$$

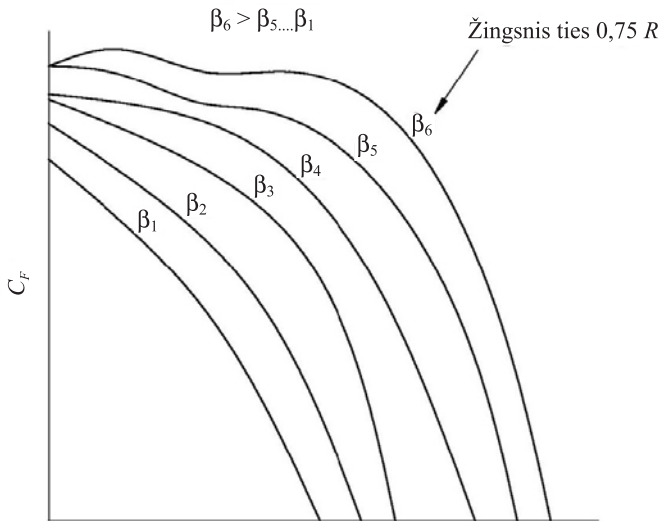
Propelerio trauka, sukimosi momentas ir galia labai priklauso nuo jo diametro ir sūkių skaičiaus per minutę ir yra tiesiogiai proporcingas oro tankiui.

Propelerio traukos, sukimosi momento ir galios koeficientai bendrai priklauso nuo mentės formos, žingsnio kampo, Reynoldo skaičiaus (Re), Macho skaičiaus, propelerio poslinkio, pvz.:

$$C_F = C_F(forma, \beta, Re, m, J), \quad C_Q = C_Q(forma, \beta, Re, m, J) \quad \text{ir}$$

$$C_P = C_P(forma, \beta, Re, m, J).$$

Nuo tada, kai besisukdamas propeleris yra aptakus kūnas, Reynoldo skaičiaus įtaka yra labai silpna.



9.3 pav. Traukos koeficiento palyginimas su padidėjusiu koeficientu, esant skirtingiems žingsnių kampams

Propeleriai dažniausiai naudojami esant daug mažesniai nei garso greičiui, todėl didžiausias santykinis greitis menčių viršuje yra mažesnis nei garso greitis. Vadinasi, anksčiau minėtas pasirinktojo propelerio formules galima supaprastinti:

$$C_F = C_F(\beta, J), C_Q = C_Q(\beta, J) \text{ ir } C_P = C_P(\beta, J) \quad (9.6)$$

Tai rodo, kad C_F , C_Q ir C_P koeficientai priklauso tik nuo žingsnio kampo β ir nuo padidėjusio koeficiento J . Tipiškas C_F kitimas prieš propelerio padidėjusio koeficiento J kitimą dėl skirtingų žingsnio kampo reikšmių parodytas 5.9 pav. Kol žingsnio kampas varijuoja išilgai mentės ilgio, $0,75 R$ žingsnis yra laikomas viso propelerio žingsnių atstojamąja.

Jeigu yra žinomas sukimosi momentas Q , galia P gaunama santykinai iš: $P = 2\pi NQ$. Panaudojus du paskutinius (5.11) lygties santykius, ji galėtų būti parašyta kaip $C_P = 2\pi C_Q$.

Tačiau yra dar vienas propelerio parametras, žinomas kaip greičio galios koeficientas, kuris žymimas C_S ir apskaičiuojamas taip:

$$C_S = J / (C_P)^{1/5} = \{V / (ND)\} / \{P / (pN^3 D^5)\}^{1/5} = \\ = \{pV^5 / (PN^2)\}^{1/5} = C_S(\beta, J).$$

C_S taip pat priklauso nuo β ir nuo J . Jeigu C_S yra specifikuotas, jis supaprastina propelerio pasirinkimą, nes neapima mentės diametro.

9.2. Propelerio efektyvumas

Sraigto efektyvumas yra svarbiausias propelerio parametras. Čia yra apibrėžtas propelerio efektyvumas, taip pat pateiktas ir žingsnio kampo bei propelerio poslinkio įtaka.

9.2.1. Propelerio efektyvumo apibrėžimas

Sraigto efektyvumas yra svarbus propeleriui būdingas bruožas, atsirandantis dėl propelerio rotacijos ore. Jis atsako į klausimą, kiek efektyvi yra variklio galia (tiekiamas galingumas arba stabdymo galingumas), panaudota išgaunant traukos jėgą (gamybinis pajėgumas). Jis apibrėžiamas kaip:

$$\text{Propelerio efektyvumas} = \text{traukos galia} / \text{stabdymo galia} = \\ = \text{trauka } X \text{ tiesioginis greitis} / \text{variklio veleno sukimosi momentas} \\ X \text{ kampinis greitis}.$$

Jeigu propelerio efektyvumas žymimas η_p , o variklio veleno sukimosi momentas Q_e , viršuje esančio santykio išraiška galima tokia:

$$\eta_p = (C_F / C_Q) J / (2\pi), \quad \eta_p = P / P_e = FV / (Q_e 2\pi N). \quad (9.7)$$

Čia trauka F gali būti paimta iš (9.3) lygties, o V yra tiesioginis orlaivio skrydžio greitis. Kai variklio velenas sukasi nustatytu apsisukimų per minutę skaičiumi, variklio sukimosi momentas Q_e yra eikvojamas aerodinaminio sukimosi momentui Q įveikti, todėl $Q_e = Q$; Q yra gaunamas iš (9.4) lygties. Viršuje minėti ryšiai tampa: $\eta_p = FV /$

$(2\pi NQ)$, ir panaudojus F ir Q ryšius iš (9.5) lygties propelerio efektyvumas gali būti išreikštas bemačių dydžių kalba:

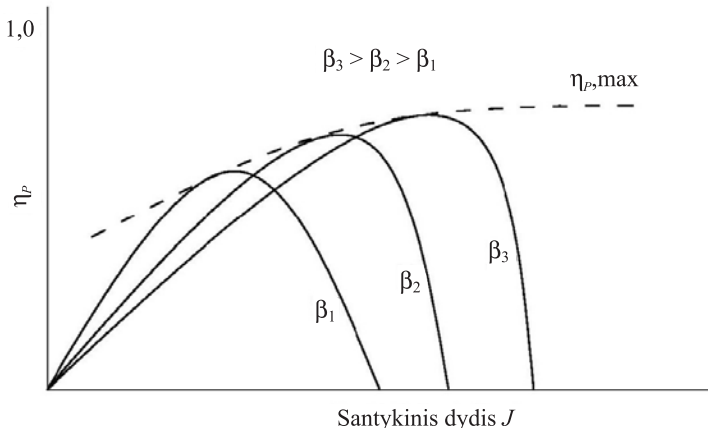
$$\eta_p = (C_F / C_Q) J / (2\pi).$$

Tai rodo, kad η_p taip pat yra β ir J funkcija, kurios veikimas bus išnagrinėtas toliau.

9.2.2. Žingsnio ir propelerio poslinkio koeficiento poveikis

Būdinga η_p ir J variacija ir skirtingos β reikšmės pavaizduotos duoto propelerio 5.10 pav. Pagrindiniai šių kreivių parametrai yra paaiškinti toliau.

Dėl bet kokio duoto β , propelerio efektyvumas iš pradžių pakyla iki didžiausios reikšmės ir tada laipsniškai mažėja. Taip yra todėl, kad propeleris sukurtas tik tam tikriems apsisukimams per minutę ir V , todėl kiekvienos mentės profilio dalies atakos kampas α yra maksimaliai aerodinamiškai efektyvus (C_l/C_d didžiausi).



9.4 pav. Propelerio poslinkio efektyvumas, esant skirtingiems žingsnių kampams

Bet koks apsisukimų per minutę ar V pokytis lemia propelerio radialinio atstumo efektyvumo mažėjimą nuo jo optimalios reikšmės.

Optimalus efektyvumas yra mažesnis nei vienetas. Taip yra todėl, kad tam tikras tiekiamas galingumas yra prarandamas propelerio dėl: 1) paviršiaus trinties ir slėgio pasipriešinimo, esančio menčių elementuose arba įvorėje, 2) sukiamų apsisukimų dėl artėjančio oro srauto, 3) viršutinių mentės dalių sukuri formavimo, 4) besiantinančio srauto sukiamos turbulencijos ir 5) prarasto spūdomo dėl aukštų, ikigarsiinių Macho skaičių, sukeliančių neįmanomas propelerio darbo sąlygas.

Esant bet kokiam fiksuotam β , maksimalus propelerio efektyvumas yra tik viena J reikšmė. Tai reiškia, kad esamo propelerio judėjimas esant tam tikriems sūkiams bus maksimaliai efektyvus tik vienam skridimo greičiui. Ankstyvuosiuose orlaiviuose buvo montuojami fiksuoto žingsnio propeleriai ir pilotas neturėjo galimybės pakeisti mentės kampo. Vėliau buvo kuriami dviejų žingsnių propeleriai, vieno žingsnio kampas skirtas pakilimo greičiui, o kitas – skrydžio greičiui. Šiuolaikiniuose orlaiviuose naudojami kintamų žingsnių propeleriai. Jie aptariami toliau, kartu su kitomis propelerių rūšimis.

10. PROPELERIO ANALIZĖ

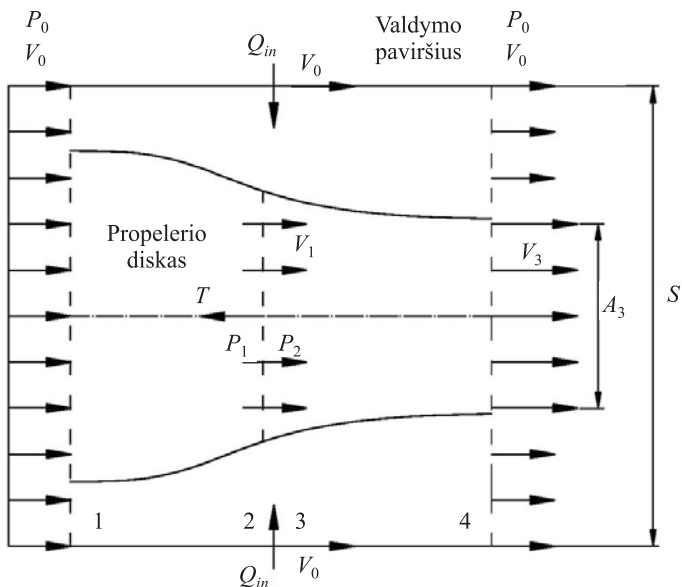
Stūmoklinio variklio ir propelerio derinio naudingumas priklauso nuo variklio ir propelerio suderinamumo, taip pat nuo jų suderinamumo su lėktuvo karkasu. Svarbu suvokti propelerio veikimą, nors dabar „reaktyvinis amžius“. Visų pirma dėl jų kainos. Juk abejotina, kad dujų turbino varikliai ateityje bus naudojami mažuosiuose bendrosios aviacijos lėktuvuose. Antra, dabar grįžta susidomėjimas turbosraigtiniais varikliais dėl jų mažesnių kuro sąnaudų, palyginti su turboreaktyviniais ar turboventiliatoriniais varikliais.

Momento teorija

Klasikinė momento teorija aprašo pagrindines propelerio charakteristikas. Kaip 10.1 iliustracijoje pavaizduota, pro propelerio diską pratekėjęs oro srautas labai susiaurėja, o statinis slėgis didėja netolygiai. Taigi šiam modeliui būdingos prielaidos:

- 1) greitis, einantis per diską, yra pastovus;
- 2) slėgis, einantis per diską, yra tolygus;
- 3) už propelerio pratekėjusiam oro srautui propelerio sūkliai neturi įtakos;
- 4) srautas, tekantis per propelerį, gali būti atskirtas nuo kitos srauto dalies aiškiai apibrėžtu srovės vamzdeliu;
- 5) oro srautas yra nespūdas.

1 skerspjuvis – oro srautas yra toli prieš propelerį, tuo metu, kai skerspjuvyje 4 yra pavaizduotas susiaurėjęs oro srautas, perėjęs per propelerį, atskirtą nuo kitos srauto dalies. Skerspjuviai 2 yra prieš propelerį, o 3 – už propelerio. Skerspjuvriuose 1 ir 4 visos tėkmės kryptys yra lygiagrečios, tad statinis slėgis yra pastovus ir vienodas laisvojo oro srauto statiniam slėgiui p_0 .



10.1 pav. Klasikinė momentų teorija. Idealaus oro srauto modelis

Kaip parodyta paveikslėlyje, laikykime, kad ir įtekanti, ir ištekanti srovė yra nenutrūkstanti bei cilindrinio kontrolės paviršiaus formos. Šio paviršiaus skersinio pjūvio plotas – S . ΔQ – tai srautas, pratekėjęs per skerspjūvį 4, minus srautas, pratekėjęs per skerspjūvį 1. Jis apskaičiuojamas taip:

$$\Delta Q = A_3 V_3 + (S - A_3) V_0 - S V_0$$

arba

$$\Delta Q = A_3 (V_3 - V_0). \quad (10.1)$$

Tarkime, kad $V_3 \neq V_0$. Tai reiškia, kad srautas ΔQ turi tekėti abiejose kontrolės paviršiaus pusėse, ta pačia kryptimi. Šio srauto greitis V_0 nukreiptas priešinga sukuriama traukai kryptimi.

Taikydami momento teoriją cilindrinės kontrolės paviršiui ir nepaisydami išorinių slėgių skirtumų gauname:

$$T = \rho \left[A_3 V_3^2 + (S - A_3) V^2 \right] - \rho S V_0^2 - \rho \Delta Q V_0.$$

10.1 formulę sulyginę su ankstesniaja gauname:

$$T = \rho A_3 V_3 (V_3 - V_0). \quad (10.2)$$

A_3 yra skersinio pjūvio plotas. Jis yra per propelerį pratekėjusio oro srauto vamzdelio gale. Taigi $\rho A_3 V_3$ yra srauto, pratekėjusio per propelerį, masė.

Trauka (T) taip pat lygi slėgių skirtumo už ir prieš diską bei disko ploto A sandaugai:

$$T = A(p_2 - p_1). \quad (10.3)$$

p_1 ir p_2 gali būti nustatomi taikant Bernulio lygtį. Nėra formulės, kuri būtų pritaikyta slėgiui, einančiam per propelerį, apskaičiuoti, nes srautas propeleryje sukuria energiją.

$$p_0 + \frac{1}{2} \rho V^2 = p_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2. \quad (10.4)$$

$$p_0 + \frac{1}{2} \rho V_3^2 = p_1 + \frac{1}{2} \rho V_2^2. \quad (10.5)$$

Atėmę 10.4 formulę iš 10.5 ir nepaisydami, kad greitis keičiasi per propelerį, gauname:

$$p_2 - p_1 = \frac{1}{2} \rho (V_3^2 - V_0^2). \quad (10.6)$$

Susijungę formulių 10.2, 10.3, ir 10.6 rezultatus, kai $A_3 V_3 = A V_1$, gauname:

$$V_1 = \frac{(V_3 + V_0)}{2}. \quad (10.7)$$

Greitis per propelerį lygus greičių prieš ir už propelerio vidurkiui. Dabar parašykime:

$$V_3 = V_0 + 2\omega. \quad (10.8)$$

ω yra propelerio sukeltas greitis. Vadinas,

$$V_1 = V_0 + \omega. \text{ Taigi:}$$

$$T = 2\rho A (V_0 + \omega) \omega. \quad (10.9)$$

Tai lengva atsiminti, kai $\rho A (V_0 + \omega)$ yra srauto, pratekėjusio per propelerį, masė, o 2 – bendrai padidėjęs srauto greitis. Taikydami energijos teoremą šiai sistemai, nustatome galią (P), pridėdamą prie srauto,

$$P = \frac{1}{2} \rho A (V + \omega) \left[(V_0 + 2\omega)^2 - V^2 \right]$$

arba

$$P = 2\rho A \omega (V_0 + \omega)^2. \quad (10.10)$$

Taikydami 10.9 formulę gauname:

$$P = T(V_0 + \omega). \quad (10.11)$$

Šie svarbūs rezultatai rodo, kad galia, reikalinga propeleriui, lygi sukuriama traukai ir greičio V_0 sandaugai. Tai gali būti suskirstoma į dvi dalis. Pirma dalis – naudingoji galia.

$$P_{naud} = TV_0. \quad (10.12)$$

Antroji dalis – indukcinė galia:

$$P_i = T\omega. \quad (10.13)$$

Pasinaudoję 10.9 formule gauname:

$$\omega = \frac{1}{2} \left[-V_0 + \sqrt{V_0^2 + \left(\frac{2T}{\rho A} \right)} \right]. \quad (10.14)$$

Statiniu atveju, kai V lygu nuliui:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{T}{2\rho A}} \quad (10.15)$$

ir

$$P_{i0} = \frac{T^{3/2}}{\sqrt{2\rho A}}. \quad (10.16)$$

Pavyzdžiui, laikykime, kad propelerio skersmuo yra 2 m (6,6 pėdos), propeleris varomas 150 kW galios variklio (201 hp). Maksimali statinė trauka apskaičiuojama pagal formulę 10.16.

$$T = P_{i0}^{2/3} (2\rho A)^{1/3}. \quad (10.17)$$

Kai $1 \text{ W} = 1,00 \text{ m-N/s}$

$$P_{i0} = 150,000 \text{ m-N/s} \\ (110,550 \text{ ft-lb/s}).$$

Esant standartiniam jūros lygiui, kai $\rho = 1,226 \text{ kg/m}^3$, tuomet:

$$T = (150,000)^{2/3} (2 \times 1,226 \times 3,14)^{1/3} = 5576 N (1254 lb).$$

Traukos T vertė apibūdina viršutinę ribą, kuri praktiškai nėra pasiekama, nes momento teorija nepaiso propelerio menčių profilio pasipriešinimo. Taip pat yra ir papildomi nuostoliai, susidarantys menčių galuose. Kadangi slėgių skirtumo menčių galuose nėra, tai už propelerio susidaro spiralės formos besidriekiantys sūkurių, panašūs į sparno sukuriamus sūkurius. Skrydžio metu, esant idealiam efektyvumui, η_i gali būti apibrėžtas kaip naudingos galios ir bendros galios santykis. η_i apskaičiuojamas pagal 10.11 formulę:

$$\eta_i = \frac{TV}{T(V + \omega)}$$

arba

$$\eta_i = \frac{1}{1 + (\omega / V)}. \quad (10.18)$$

Taikant 10.14 formulę, ω/V gali būti rašoma taip:

$$\frac{\omega}{V_0} = \frac{1}{2} (-1 + \sqrt{1 + T_c}). \quad (10.19)$$

Čia traukos koeficientas T_c apibrėžiamas pagal:

$$T_c = \frac{T}{qA}. \quad (10.20)$$

Vadinasi, η_i :

$$\eta_i = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + T_c}}. \quad (10.21)$$

Propelerio trauka, paskirstyta disko plote, vadinama *disko apkrova*. Kadangi ši apkrova artėja prie nulio, tai idealus efektyvumas artėja prie vieneto.

Pavyzdžiui, laikykime, kad Cherokee180 propelerio skersmuo yra 1,88 m (6,17 pėdos). Kreiserinio greičio 60,4 m/s (135mph), esant standartiniam jūros lygiui, pasipriešinimas $\approx 1390 \text{ N}$ (312 svarai). Taigi $T_c = 0,224$, kai $\eta_i = 0,95$. Kaip matysime vėliau, tikrasis propelerio efektyvumas didesnis nei 0,83. Pagal momentų teoriją apskaičiuotas naudingumo koeficientas, kaip ir statinė trauka, yra daug didesni nei galima pasiekti.

Nors momento teorija, kaip ir numatyta trauka, nėra labai tikslios, tačiau ji naudojama indukciniam greičiui skaičiuoti. Įdomu ir lengva atsiminti šiuos ryšius: galiausiai suvokiame, kad dinaminis propelerio slėgis lygus oro srauto dinaminio slėgio ir disko apkrovos sumai.

Menčių elementų teorija

Norint suprojektuoti propelerį ar numatyti esamo propelerio charakteristikas, būtina išsamiai išnagrinėti menčių aerodinamiką. 10.2 pav. pavaizduotas trijų menčių propelerio vaizdas iš priekio. Jame nurodytas kampinis greitis ω (rad/s). Du cilindriniai koncentriniai paviršiai su sukimosi ašimi ir diferencinis atstumas nuo dr ; nepaisant propelerio mentės pjūvio, iki spindulio r nuo jo ašies. 10.3 pav. taip pat matome mentės elementus. Kai žiūrime į mentes iš priekio, tai profilis juda dešinėn (sukimosi kryptimi) link puslapio viršaus.

Tolesnė analizė – apskaičiuoti žingsnio kampo β . Kampas β nubrėžiamas nuo sukimosi plokštumos iki nulinės (profilio centrinės) ašies.

Ankstyvojoje literatūroje propeleriai buvo suvokiami kaip „oras-raigtis“ (*airscrews*). Jei propeleris „sraigtas“ suktųsi be slydimo, tai sraigtas pasislinktų per visą apsisukimą – tai ir vadinama žingsniu. (žr. 10.3 pav.).

$$p = 2\pi r \tan \beta. \quad (10.22)$$

Propeleriai gali būti skirstomi pagal jų žingsnį, diametrą ir postūmį. Taigi:

$$\frac{p}{D} = \pi x \tan \beta,$$

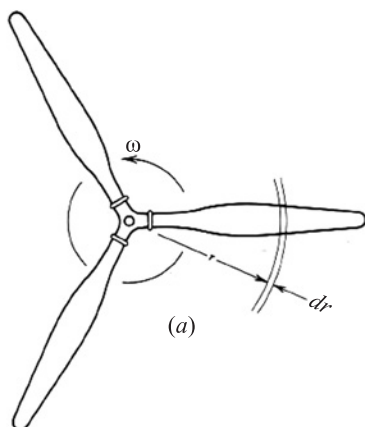
čia $x = r/R$.

Pastovaus žingsnio propeleris yra toks, kurio žingsnis nekinta. Tokiam propeleriui taikoma formulė:

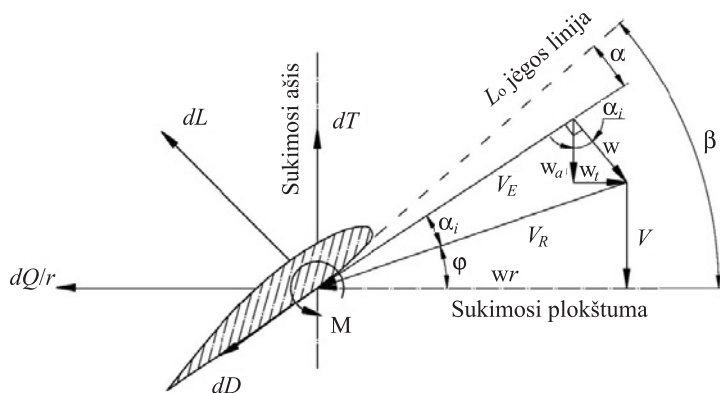
$$\beta = \tan^{-1} \frac{p/D}{\pi x}. \quad (10.23)$$

Mentės viršūnėje x artėja prie 1, taigi:

$$\beta(x=1) = \tan^{-1} \frac{p/D}{\pi}.$$



10.2 pav. Trijų menčių propelerio vaizdas iš priekio



10.3 pav. Propelerio mentės veikiančios jėgos bei greičiai: mentės pjūvis

Pastovaus, fiksuoto bei kintamo žingsnio terminai yra dažnai painiojami. Pastovus žingsnis – griežtai apibrėžiamas sudarant propelerio geometriją. Fiksuotu arba kintamu žingsniu laikoma, kai galima pakeisti mentės išstatymo kampą. Fiksuotas žingsnis – kai mentės kampas pakeičiamas prieš skrydį, o kintamas žingsnis – kai kampą galima keisti skrydžio metu. Kai kurie propeleriai yra įrengti su reguliatoriais, kad palaikytų pastovius apsisukimus per minutę (rpm). Tai padaroma,

didinant menčių žingsnio kampus, nes aps./min. didėja dėl didėjančios galios arba atvirkščiai. Toks propeleris vadinamas pastovaus greičio propeleriu.

Iš 10.3 pav. matome, kad vienos mentės elemento nauda traukai T ir sukimo momentui Q yra:

$$dT = dL \cos(\varphi + \alpha_i) - dD \sin(\varphi + \alpha_i), \quad (10.24a)$$

$$dQ = r \left[dL \sin(\varphi + \alpha_i) + dD \cos(\varphi + \alpha_i) \right]. \quad (10.24b)$$

dL ir dD yra keliamosios ir pasipriešinimo jėgų diferencialai. Panašu į baigtinę sparno teoriją, α_i yra atakos kampas, atsirandantis dėl greičio ω . dL ir dD gali būti apskaičiuojami:

$$dL = \frac{1}{2} \rho V_E^2 c C_l dr, \quad (10.25a)$$

$$dD = \frac{1}{2} \rho V_E^2 c C_d dr. \quad (10.25b)$$

Styga c yra funkcija nuo spindulio r . Kreipiančioji C_d priklauso nuo kreipiančiosios C_l . Tai taip pat gali priklausyti nuo Reynoldso ir Macho skaičių. C_l apskaičiuojamas:

$$C_l = \alpha(\beta - \varphi - \alpha_i). \quad (10.26)$$

Kyla dilema. Mums reikalinga α_i , kuri yra ω funkcija, kad gautume menčių apkrovą. Bet ω priklauso nuo menčių apkrovos.

Menčių elementų momentų teorija

Jei manome, kad α_i ir pasipriešinimo bei keliamosios jėgos santykis per mažas, kai $V_E \approx V_R$, tai pagal formulę 10.24 (menčių skaičiui B) apskaičiuojame:

$$dT = \frac{B\rho}{2} V_R^2 c a (\beta - \varphi - \alpha_i) \cos \varphi dr.$$

Pritaikę momentų principus diferenciniams žiedams ir laikydami, jog $\omega \approx V_R \alpha_i$ mes galime rasti dT :

$$dT = \rho(2\pi r dr) (V + V_R \alpha_i \cos \varphi) 2V_R \alpha_i \cos \varphi.$$

Sulyginę šias dvi išraiškas, gauname α_i kvadratą:

$$\alpha_i^2 + \alpha_i \left(\frac{\lambda}{x} + \frac{\sigma a V_R}{8x^2 V_T} \right) - \frac{\sigma a V_R}{8x^2 V_T} (\beta - \varphi) = 0.$$

Čia

$$\lambda = \frac{V}{\omega R}, \quad V_R = V_T \sqrt{x^2 + \lambda^2},$$

$$\sigma = \frac{Bc}{\pi R}, \quad \varphi = \tan^{-1} \frac{\lambda}{x},$$

$$V_T = \omega R, \quad x = \frac{r}{R}.$$

Indukcinis atakos kampas apskaičiuojamas:

$$\alpha_i = \frac{1}{2} \left\{ - \left(\frac{\lambda}{x} + \frac{\sigma a V_R}{8x^2 V_T} \right) + \left[\left(\frac{\lambda}{x} + \frac{\sigma a V_R}{8x^2 V_T} \right)^2 + \frac{\sigma a V_R}{2x^2 V_T} (\beta - \varphi) \right]^{1/2} \right\}. \quad (10.27)$$

Esamoji geometrija, į priekį nukreiptas greitis ir sukimosi greitis panaudojamas 10.27 formulėje, kad būtų galima apskaičiuoti α_i . Formulės 10.24a ir 10.24b gali būti siejamos, naudojantis 10.25 ir 10.26 formulėmis, kad būtų galima apskaičiuoti trauką ir sukimo momentą.

Propelerio trauka ir jėga paprastai būna išreiškiamos per koeficientus. Traukos ir galios koeficientus galime aprašyti įvairiais būdais, atsižvelgiant į tai, kokie yra turimi greičiai ir plotai. Atliekant propelerio tyrimą beveik visada gauname traukos koeficientą C_T ir galios koeficientą C_P . Juos apskaičiuojame:

$$C_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}, \quad (10.28a)$$

$$C_P = \frac{P}{\rho n^3 D^5}, \quad (10.28b)$$

čia n – sukiai (aps./s), D – propelerio skersmuo. Trauka, jėga, ρ ir D turi būti pastovūs dydžiai. Galime teigti, kad nD yra greičio, o D^2 – ploto charakteristika.

Iš 10.3 pav. matome srauto atstojamosios kampą φ . Jis yra V ir ωr santykis:

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{V}{\omega r}.$$

Tai gali būti rašoma ir taip:

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{J}{\pi x}. \quad (10.29)$$

Propelerio poslinkis J apskaičiuojamas:

$$J = \frac{V}{nD}. \quad (10.30)$$

Taigi C_T ir C_p yra apskaičiuojamos kaip J išvestinės:

$$C_T = \frac{\pi}{8} \int_{x_h}^1 (J^2 + \pi^2 x^2) \sigma [C_l \cos(\varphi + \alpha_i) - C_d \sin(\varphi + \alpha_i)] dx, \quad (11.31a)$$

kai $P = \omega Q$:

$$C_P = \frac{\pi}{8} \int_{x_h}^1 \pi x (J^2 + \pi^2 x^2) \sigma [C_l \sin(\varphi + \alpha_i) + C_d \cos(\varphi + \alpha_i)] dx, \quad (11.31b)$$

x_h – mentės pradžios centras. x_h yra sutartinis centras, tačiau jis nedaro įtakos C_T ir C_P vertėms.

Taigi duota: D , V , ρ , ir n . Taip pat c ir β , kurie pateikti kaip x funkcija. x ir α_i yra apskaičiuojami pagal 10.27 formulę. Paskui apskaičiuojami C_l ir C_d ir galiausiai dC_T/dx ir dC_P/dx . C_T ir C_P gauname sprendami integralą nuo x_h iki 1.

Žinodami J ir apskaičiavę C_T ir C_p reikšmes galime nustatyti propelerio efektyvumą. Naudinga galia nustatyta iš TV ir P yra žinoma kaip tiekimo galia. Taigi:

$$\eta = \frac{TV}{P}. \quad (10.32)$$

Šiuo atveju C_T , C_p ir J panaudojami:

$$\eta = \frac{C_T J}{C_p}. \quad (10.33)$$

Apie bendrą menčių elemento momento teoriją daugiausia sužinojome iš literatūros. Tačiau dabar patogiau naudotis kompiuteriu. Sūkurių teorija, kuri bus aprašoma vėliau, yra daug tikslesnė – gaunami tikslesni eksperimentiniai rezultatai, nes įvertinamas profilio pasipriešinimas.

11. SŪKURIŲ TEORIJA

Kitos menčių elemento teorijos skiriasi nuo bendrosios menčių elemento momento teorijos. Pagrindiniai metodai pagrįsti sūkurių modelių analogais baigtinio sparno kilimo paviršiams tirti. Sūkurių geometrija yra nustatoma pasinaudojant kitu sūkuriu, kuris yra lygiavertis atstojamojo srauto rezultatams.

Sūkurių teorija prasideda nuo optimalaus propelerio nagrinėjimo ir prieinama prie vadinamosios Betz sąlygos. Ši sąlyga gali būti gauta nagrinėjant pagrindinį propelerio sukeltą sūkūrį arba sūkuriuotą srautą. 10.3 pav. pavaizduota menčių geometrija ir propelerio greičiai. 10.4 pav. pavaizduoti tie patys dydžiai, tik toliau už propelerio. Šiame paveikslėlyje žymėjimas panašus į Betz žymėjimą. 10.4 pav.: Ωr yra sukimosi greitis, o V – propelerio (*advance*) greitis. ω yra greitis, sukeltas galinio sūkurių sistemos, o ωr ir v yra tangentiniai ir ašiniai komponentai, atitinkantys ω . Šitie sukelti greičiai yra maždaug dvigubai didesni, nei pateikti 6.10 b pav. ω_0 yra fiktyvus greitis, kaip ir smūginis greitis. Jei sraigtinis paviršius judės ta pačia kryptimi kaip ir sūkurių paviršius dėl simetrijos, tai greičio potencialas ϕ liks nepakitęs. Taigi ϕ šia kryptimi yra nulis, vadinasi, sūkurių sukeliamas greitis turi būti normalus.

Propelerio menčių aerodinaminė keliamoji jėga apskaičiuojama taip pat kaip ir sparno. 10.4 pav. pavaizduoti greičiai, sukelti galiniame sūkuryje. Jei $\Delta\Gamma$ padidėja iki Γ , tai atitinkamai padidėja trauka ir sukimo momentas ΔT ir ΔQ , tai bendras efektyvumas, kuris yra r funkcija, gali būti nustatomas:

$$k = \frac{V \Delta T}{\Omega \Delta Q}. \quad (11.1)$$

Norint gauti optimaliausią propelerį, k turi būti lygus konstantai ir nepriklausyti nuo r , nes kitu atveju Γ padidėtų, kai k reikšmė būtų didžiausia ir priešingai – Γ mažėtų, kai k reikšmė būtų mažiausia. Būtent taip yra didindamas bendras efektyvumas.

11.1 pav. matome pateiktą Kutta-Joukowski ryšį:

$$\Delta T = \rho(\Omega - \omega)r\Delta\Gamma,$$

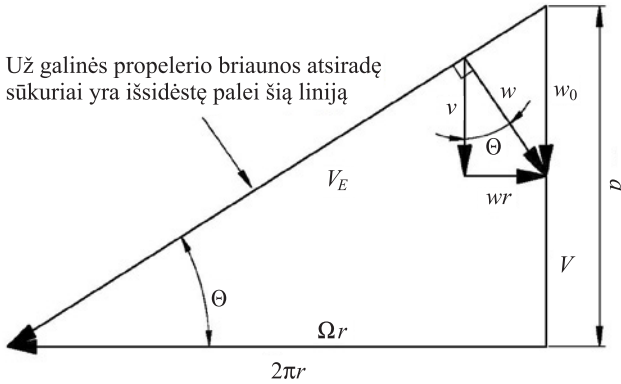
$$\Delta Q = \rho(V + v)r\Delta\Gamma.$$

Čia:

$$k = \frac{V(\Omega - \omega)}{\Omega(V + v)}.$$

Remiantis 11.1 pav. pateikta geometrija:

$$p = 2\pi r \tan \theta = 2\pi r \frac{(V + v)}{(\Omega - \omega)r}.$$



11.1 pav. Sūkurių susidarymo už propelerio briaunos principas

Taigi abiem atvejais (kalbama apie k), prieinama prie Betz sąlygos, kai p (laipsnis besitęsiančio sūkurių paviršiaus) propeleriu pratekėjusio srauto gale yra optimalaus propelerio konstanta. Rezultatas – smūginis greitis w_0 turi būti konstanta.

Goldsteino klasikinė sūkurių teorija yra panaši į anksčiau aprašytąjį sūkurių modelį, kuris patenkina Betz sąlygą. Sūkurių paviršius, besidriekiantis nuo propelerio menčių, turi gulėti ta pačia kryptimi kaip ir sraigto paviršius. Optimalaus propelerio įprastas greitis turi būti lygus nuliui. Tai tokia pat sąlyga, kuri yra patenkinama ir kietam (vientisam) sraigtiniam paviršiui judant skysčiu. Taigi Goldsteinas išsprendė šią lygiavertę potencialaus srauto problemą, kad numatytų sukutuko apkrovas veikiančias mentes.

10.3 pav. matome, kad normalios būklės sąlyga tarp greičio atstojamosios V_E ir indukcinio greičio ω yra tariama. Iš tikrųjų, sukursys kontaktuoja pasroviui propelerio, kaip ir padidėjęs indukcinis greitis, taigi normali propelerio plokštumos būklė nėra taip lengvai pagrįdžiama kaip galinis srautas.

10.3 pav. kylantis indukcinis greitis ω yra sudarytas iš tangentinio komponento ω_t ir ašinis komponento ω_a^* , ω_b , ir ω_a nustatomas:

$$\frac{V + \omega_a}{\omega r - \omega_t} = \frac{\omega_t}{\omega_a}.$$

ω_a gali būti nustatomas kaip ω_t funkcija:

$$\omega_a = \frac{1}{2} \left[-V + \sqrt{V^2 + 4\omega_t(\omega r - \omega_t)} \right].$$

Patogu išreikšti visus greičius per laiko tarpą $V_T = \omega R$. V nėra naudojamas kaip didėjantis, statišku atveju V bus nulis. Išreiškiant V_T :

$$\frac{\omega_a}{V_T} = \frac{1}{2} \left[-\lambda + \sqrt{\lambda^2 + 4 \frac{\omega_t}{V_T} \left(x - \frac{\omega_t}{V_T} \right)} \right]. \quad (11.2)$$

Kaip jau minėjome, λ yra kitas paankstinimo santykis. Jis yra tiesiog apibrėžtas kaip V/V_T ir x yra bedimensis spindulys, r/R , kai R yra propelerio spindulys.

Goldsteino sukurio teorija sieja ω_t su vykstančia cirkuliacija Γ aplink bet kokią mentės vietą:

$$B\Gamma = 4\pi r \kappa \omega_t. \quad (11.3)$$

k yra žinomas kaip *Goldstein kappa* faktorius. Šis faktorius nėra išreiškiamas konkrečiai, bet literatūroje galime rasti grafinę jo formą. *Prandtl*io galiuko netekimo faktorius F yra apytiksliai lygus k , kuris yra tikslesnis nei J reikšmės sumažėjimas ar menčių skaičiaus padidėjimas. Taigi:

$$B\Gamma \approx 4\pi r F \omega_t. \quad (11.4)$$

Kur:

$$F = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \exp \left[-\frac{B(1-x)}{2 \sin \phi_T} \right]. \quad (11.5)$$

φ_T yra propelerio sraigto besitęsiančio sūkurio sistemos kampas. Lengvai apkrauto propelerio:

$$\varphi_T = \tan^{-1} \lambda. \quad (11.6)$$

Kad ir kaip būtų, keliamoji jėga nuo mentės galo turi išnykti. Tai apibendrinant reiškia, kad bendras atakos kampas mentės gale lygus nuliui. Taigi kita φ_T išraiška gali būti gaunama remiantis 10.2 pav.:

$$\varphi_T = \beta_T. \quad (11.7)$$

Daugeliu atveju 11.7 formulė gaunama iš 11.6.

Iš Kutta-Joukowski teoremos:

$$L = \rho V \Gamma.$$

Taigi:

$$\Gamma = \frac{1}{2} c C_l V_e. \quad (11.8)$$

Taigi 11.8 formulę įrašę į 11.4 formulę gauname:

$$\sigma C_l \frac{V_e}{V_T} = 8x F \frac{\omega_t}{V_T}. \quad (11.9)$$

C_l galime apskaičiuoti iš:

$$C_l = a(\beta - \alpha_i). \quad (11.10)$$

Čia:

$$\alpha_i = \tan^{-1} \left(\frac{\omega_t}{\omega_a} \right).$$

V_e/V_t apskaičiuojama iš:

$$\frac{V_e}{V_T} = \sqrt{\left(\lambda + \frac{\omega_a}{V_T} \right)^2 + \left(x - \frac{\omega_t}{V_T} \right)^2}. \quad (11.11)$$

Indukcinis atakos kampas gali būti nustatomas:

$$\alpha_i = \tan^{-1} \left(\frac{V + \omega_a}{\omega r - \omega_t} \right) - \varphi. \quad (11.12)$$

Lygtys 11.2–11.12 gali būti išspręstos kaip: $\omega_t/V_t^* C_b$, ir kiti dydžiai gali būti randami įvertinant C_T ir C_p . Jie nustatomi iš panašių formulių 11.13a ir 11.13b.

$$C_T = \frac{\pi}{8} \int_{xh}^1 \left(\frac{V_l}{V_T} \right)^2 \sigma [C_l \cos(\varphi + \alpha_i) - C_d \sin(\varphi + \alpha_i)] dx, \quad (11.13a)$$

$$C_p = \frac{\pi}{8} \int_{xh}^1 \pi x \left(\frac{V_l}{V_T} \right)^2 \sigma [C_l \sin(\varphi + \alpha_i) - C_d \sin(\varphi + \alpha_i)] dx. \quad (11.13b)$$

Yra keli patobulintos klasikinės sūkurio teorijos variantai. Pirmas įvertina profilio pasipriešinimą, kuris jau buvo panaudotas C_T ir C_p formulėse, jungtinėje mentės elemento-momento teorijoje.

Antras, skirtas mažam tipiškam lėktuvo propeleriui, kyla iš baigtinio mentės storio. Ašinis srauto komponentas, $V + w_a$, turi labai padidėti ir praėjus pro propelerį sumažėti. Srovės kelio rezultatai – tai efektyviai sumažėjęs mentės dalies atakos kampas. Siekdami gauti apytikslę elipsinės mentės dalies reikšmę, remiamės α funkciją nuo mentės storio.

$$\Delta\alpha = \frac{4\lambda\sigma}{15(\lambda^2 + x^2)} \frac{t_{\max}}{C}. \quad (11.14)$$

Trečia korekcija – išgaubimas ir indukcinio greičio tangentinių komponentų rezultatai, didėjantys nuo nulio iki maksimalios reikšmės einant per propelerį. Šie srovės kreivumo rezultatai – tai kiekvienos mentės dalies redukuoti efektyvieji išlinkiai. Pagrindiniai sprendiniai atskleidžiami 3.3 formulėje. Iškeliant prielaidą, kad keliamosios jėgos koeficientas lygus nuliui, atakos kampą galima apskaičiuoti:

$$\Delta C_l = \frac{a\Delta\Theta}{4}. \quad (11.15)$$

Kampas $\Delta\Theta$ apskaičiuojamas iš:

$$\Delta\Theta = \tan^{-1} \left(\frac{V + w_a}{wr - 2w_l} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{V + w_a}{wr} \right). \quad (11.15)$$

Pateikiame mentės geometrines ir eksploatacines sąlygas J reikšme, w_l iteracijoms:

1. Tarkime, $w_l/V_T = 0$. Tada skaičiuojame pagal nurodymus.
2. W_d/V_T randamas iš 11.1 formulės.

3. α ir C_{l0} koregavimas.
4. α_i iš 11.11.
5. α iš $\beta - \alpha_i - \varphi - \Delta\alpha$.
6. Cl iš $a\alpha + C_{0l} - \Delta C_{0l}$.
7. V_E/V_T iš formulės 11.10.
8. Γ iš formulės 11.7.
9. w_i iš formulės 8.2.

9 žingsnio rezultatų negauname, kol neatliekame 2 žingsnio skaičiavimų. Skirtumas tarp apskaičiuoto α_i ir pirminės jos reikšmės nėra, pvz., 0,00001 rad.

Paskutiniosios iteracijos α_i sprendiniui alternatyva taikoma tiesiogiai, jei kampas yra tariamai mažas. Šiuo atveju 3.3 paragrafe nurodyta, kad α_i galime apskaičiuoti:

$$w_i = V_R \alpha_i \sin(\varphi + \alpha_i), \quad (11.16)$$

$$w_a = V_R \alpha_i \cos(\varphi + \alpha_i). \quad (11.17)$$

Indukcinis atakos kampas apytiksliai lygus:

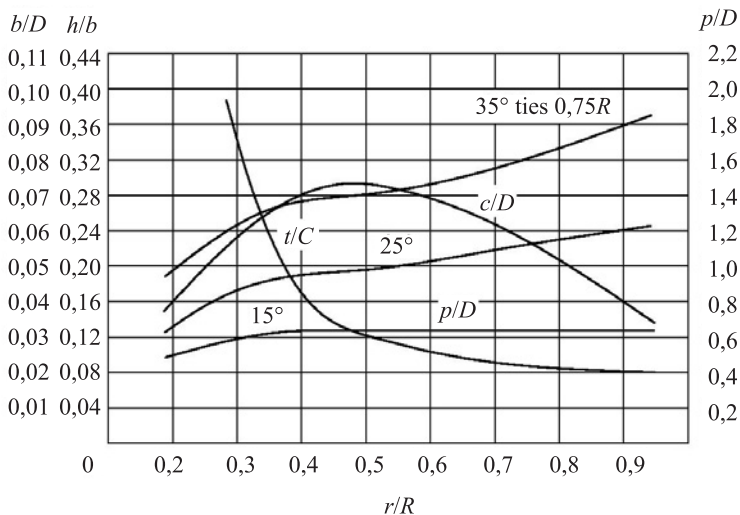
$$\alpha_i = \frac{1}{2} \left(-X + \sqrt{X^2 + 4Y} \right). \quad (11.18)$$

Čia:

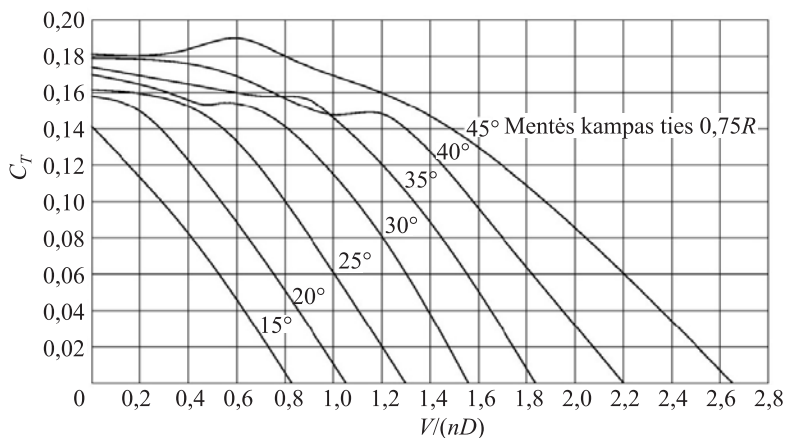
$$X = \tan \varphi + \frac{a\sigma}{8xF \cos \varphi}, \quad (11.19)$$

$$Y = \frac{a\sigma(\beta - \varphi)}{8xF \cos \varphi}. \quad (11.20)$$

11.2 pav. pateikta trijų menčių propelerio geometrija veikiant sukuriams. Pateikti 3-jų menčių, 5868-R6 modelio, Clark-Y tipo konkretaus propelerio testo rezultatai aerodinaminiam vamzdyje. Šie analizės rezultatai pateikti 11.3, 11.4 ir 11.5 paveikslėliuose.



11.2 pav. 3-jų menčių, 5868-R6 modelio, Clark-Y tipo konkretaus propelerio geometriniai rezultatai



11.3 pav. Traukos koeficientas, remiantis 11.2 pav. duomenimis

Šis konkretus propeleris turi pastovų žingsnį, kuris artimas 35 proc. spindulio dalies galiuko išorėje, atitinkamai 15° mentės

kampo 75 proc. spindulio dalies. Iš apibrėžimo apskaičiuojame žingsnį:

$$p = 2\pi r \tan \beta. \quad (11.21)$$

Tuo atveju p/D bus 0,631, β 15°, kai x yra 0,75. Kitais atvejais žingsnis apskaičiuojamas taip:

$$\beta = \tan^{-1} \frac{0,631}{\pi x}. \quad (11.22)$$

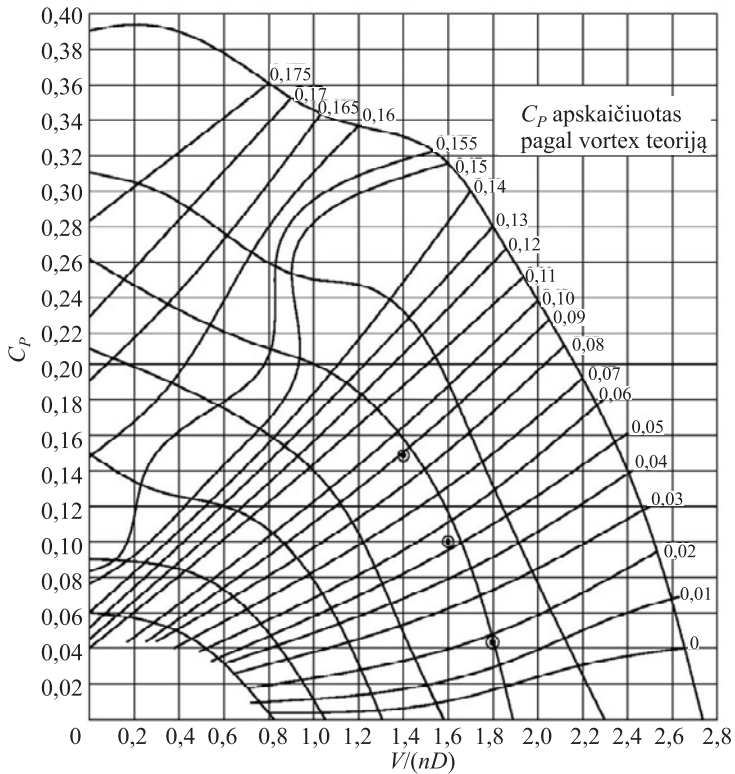
Šis propeleris yra keičiamo žingsnio. Vadinasi, mentės žingsnio kampas gali būti keičiamas visomis kryptimis. 11.3, 11.4 ir 11.5 pav. yra pateiktos skirtingų β dydžių kreivės (β yra 75 proc. mentės dalyje). Jei $\alpha_{0,75}$ nurodo kampą, tai β apskaičiuojama:

$$\beta = \beta_{0,75} - 15 + \tan^{-1} \left(\frac{0,631}{\pi x} \right). \quad (11.23)$$

Šio propelerio β kampas siejamas su styga.

Iš anksčiau pateiktų iliustracijų matome propelerio pokyčius, kurie susideda iš r/R vertės ir x vertės, parinktos iš 11.2 pav. esant 0,6. Propeleris yra paimtas, kad veiktų esant 1,4 santykiui su 35° menčių kampu, 0,75 dalyje. Žingsnio ir skersmens santykis, p/D , lygus 0,631 išilgai mentės, sudarydamas x : 0,6 iki 18,508° žingsnio kampą, esamos mentės kampas – 15°, 0,75 dalyje. Taigi esamosios mentės kampas nuo 35° žingsnio kampo esant 0,6 dalyje bus 38,508°.

Pagal 10.29 formulę rastas rekomenduojamas santykis 1,4, tuomet kampas ϕ gaunamas 36,60°, kai $x = 0,6$. Propelerio gale $x = 1$, tuomet mentės žingsnio kampas lygus 31,36°. Šis bei prieš tai apskaičiuotas ($x = 0,6$) mentės žingsniai susiję su styga ir turi būti pritaikomi prie nustatytos nulinės keliamosios jėgos linijos.

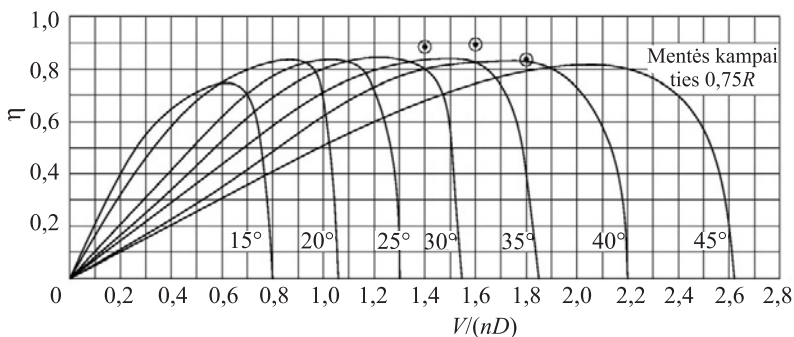


11.4 pav. Propelerio galios koeficientas remiantis
11.2 pav. duomenimis

Šio profilio kampas tarp nulinės keliamosios jėgos linijos ir stygos apytiksliai lygus:

$$\alpha_{0l} = 46 \frac{t}{C} . \quad (11.24)$$

Iš 11.2 pav. santykinis storis, kai $x = 0,6$ ir 1 lygus $0,103$ ir $0,082$. Taigi prie nulinės keliamosios jėgos linijos, kai $x = 0,6$ ir 1 žingsnio kampas lygus $4,738^\circ$ ir $3,77^\circ$ Remiantis 6.38 ir 6.40 formulėmis *Prandtlio* noselės nuostoliai lygūs $0,771$.



11.5 pav. Propelerio naudingumas remiantis 11.2 pav. duomenimis

Atakos kampas tikslinamas, nes mentės galutinio storio reikšmė gaunama iš 6.46 formulės ir lygi $0,175^\circ$. Srauto, pratekančio per mentę, kreivę įvertinama remiantis pirmine $\Delta\Theta$ reikšme, apskaičiuota iš 6.49 formulės. Šiuo atveju gaunama tiksli reikšmė, lygi $1,196^\circ$. Keliamosios jėgos koeficientas mažėja, kai iš 11.14 formulės gauname 0,033. *Clark* – Y profilio keliamosios jėgos kreivės mažėjimas:

$$a = 0,1 \left(1 + \frac{t}{C} \right). \quad (11.25)$$

Šios dalies pasipriešinimo koeficientas bus reikalingas kaip C_l funkcija. *Clark* – Y profilio C_d apytiksliai lygus:

$$C_d = C_{d\min} + 0,010(C_l - 0,15)^2. \quad (11.26)$$

Čia:

$$C_{d\min} = 0,004 + 0,017 \frac{t}{C}. \quad (11.27)$$

Šiuo atveju, kai mentės dalis gali atsilikti, galime patikrinti (Cl) reikšmę pagal linijinę teoriją ir tuomet riboti iki maksimalios C_l reikšmės. Šiems skaičiavimas laikome, kad:

$-0,8 \leq Cl \leq 1,2$. Po mentės atsilikimo atakos kampas ir C_d greitai padidėja. Apytikslė $C_{d\min}$ reikšmė po mentės atsilikimo apskaičiuojamas:

$$C_{d \min} = C_{d \min}(C_{l \max}) + 0,044(\alpha - \alpha_{\max}). \quad (11.28)$$

Atakos kampo $\alpha_{\max}$ reikšmė laipsniais atitinka $C_{l \max}$.

Manykime, kad w_l/V_T lygi 0,01263. Ji gaunama iteracijų būdu, naudojant kompiuterinę programą. w_d/V_T reikšmė lygi 0,01606 (remiantis 11.4 formule). Pagal formulę 11.12 apskaičiuotas indukcinis atakos kampas lygus $0,566^\circ$.

Derinant β , α_i , φ ir α reikšmes, priklausančias nuo storio, apskaičiuojamas atakos kampas $\Delta\alpha$, jis lygus $4,426^\circ$.

Atakos kampo didėjimas pagal keliamosios jėgos kreivės mažėjimą iš formulės 6.55 apskaičiuojamas, pridendant C_{l0} , ir atimant C_l reikšmę 0,4552.

Iš formulės 6.44 V_e/V_T yra lygus 0,7471. Γ/DV_T lygus 0,0124. Galiausiai ši reikšmė įrašoma į 11.3 formulę ir gauname w_l/V_T , kuris lygus 0,01263. Taigi indukcinis efektyvumas išaiškina, kad profilio keliamosios jėgos duomenys yra nuosekliai susiję su sūkuriu teorija.

Norint rasti C_d naudojama 11.23 formulė ir anksčiau apskaičiuotos reikšmės. C_T ir C_p sumažėjimas randamas iš 11.12a ir 11.12b formulių.

$$\frac{dC_T}{dx} = 0,1064,$$

$$\frac{dC_P}{dx} = 0,1635.$$

Pateikiami 11.6 ir 11.7 pav. su grafikais. Iš šių paveikslėlių matome, kad C_T ir C_p rezultatai yra artimi eksperimentiniams rezultatams, ypač esant mažiausiems menčių kampams prie J , kai mentės neatsilieka. Kol J mažėja, atakos kampas didėja, kol J nepasiekia žemiausios mentės atsilikimo reikšmės. Esant mažesniems rezultatams, ši teorija nebelyginama su eksperimento rezultatais.

Pavyzdžiui, iš 11.6 pav. aiškiai matyti, jog mentės kampui esant 25° propelerio mentės atsilieka, kai J reikšmė mažiau už 0,5.

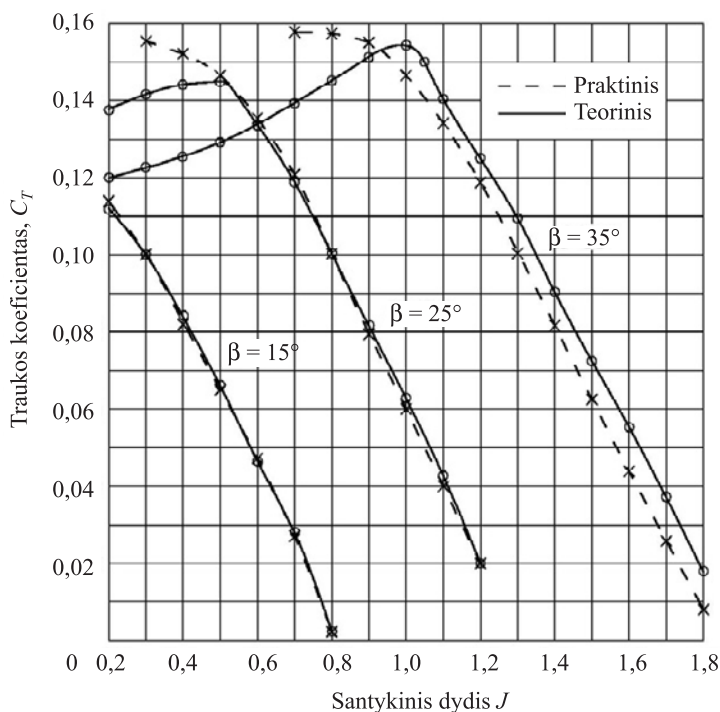
J reikšmė, kai trauka artėja prie 0, gali būti greitai nustatoma remiantis nulinės keliamosios jėgos atakos kampo rodmenimis:

$$\beta - \tan^{-1} \left(\frac{J}{\pi x} \right) + \alpha_{0l} = 0$$

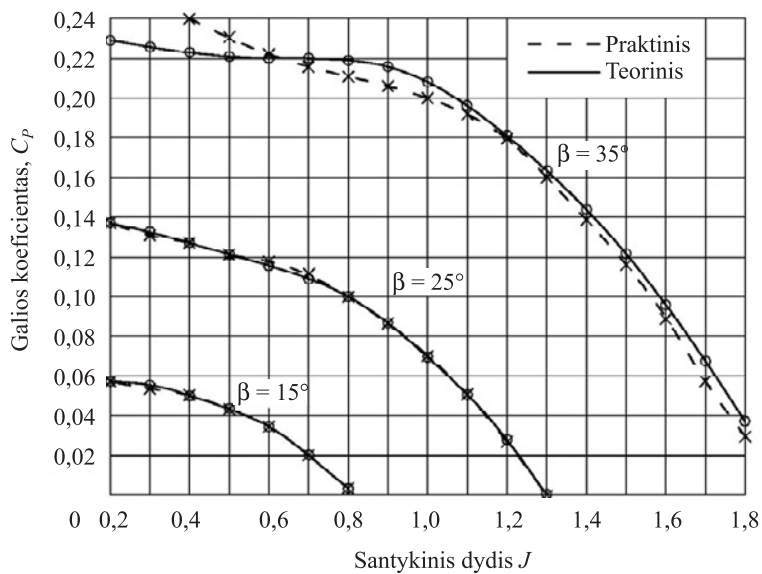
arba

$$J = \pi x \tan(\beta + \alpha_{0l}). \quad (11.29)$$

Konkrečiai šio propelerio t/c lygu 0,085, 75 proc. dalyje α_{0l} lygus $3,91^\circ$. Taigi iš formulės 11.29, kai $\beta = 25^\circ$, rekomenduojamosios nulinės traukos santykis lygus 1,30. Jis yra artimas reikšmei, pateiktai 11.6 pav.



11.6 pav. Traukos iš sūkurio teorijos prognozių lyginimas su propelerio eksperimento duomenimis iš 11.2 pav.



11.7 pav. Traukos iš sukurio teorijos prognozių lyginimas su propelerio eksperimento duomenimis iš 11.2 pav.

IŠVADA

Nagrinėjome, kaip sukurti optimalų propelerį, kuris savo funkcijas atliktų kuo geriau. Buvo remiamasi Adkinso, Liebecko, Bauerio, Ribnerio ir Fosterio darbais. Gvildenama propelerių teorija ir jų taikymas propeleriniams lėktuvams. Nustatyta, kad propelerio efektyvumas dažnai yra 80–85 proc. Remiantis bendrosios aviacijos bendraisiais propelerių grafikais praktiškai paaiškinta, kaip tai apskaičiuoti.

Literatūra

Anderson, J. D. 1989. Jr. *Introduction to Flight*. McGraw-Hill, New York.

Dommasch, D. O.; Sherby, S. S.; Connolly, T. F. 1967. *Airplane Aerodynamics*.
4th ed., Ritman, New York.

McKinley, J. L.; Bent, R. D. 1965. *Powerplants of Aerospace Vehicles*, 3rd
ed., McGraw-Hill, New York.