Eugenijus PILECKAS

AVIACINIAI SKRYDŽIO VALDYMO PRIETAISAI IR SISTEMOS

Vilnius „Technika“ 2011

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Eugenijus PILECKAS

AVIACINIAI SKRYDŽIO VALDYMO PRIETAISAI IR SISTEMOS

Mokomoji knyga

Vilnius „Technika“ 2011

UDK 629.7 (075.8)
Pi62

Eugenijus Pileckas. Aviaciniai skrydžio valdymo prietaisai ir sistemos: mokomoji knyga.
Vilnius: Technika, 2011. 308 p.

Knygoje pateikiama žinių apie aviacinius prietaisus ir sistemas. Aprašomos orlaivio skrydžio valdymo ir jėgainės parametrų kontrolės prietaisų konstrukcijos, struktūra, veikimo principai, paklaidos, automatizuotų skrydžio valdymo sistemų sandara ir veikimo algoritmai.

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

Leidinį rekomendavo VGTU Antano Gustaičio aviacijos instituto studijų komitetas

Recenzavo: doc. E. Lasauskas, VGTU AGAI Aviacinės mechanikos katedra
doc. V. K. Maceika, VGTU AGAI Aviacijos technologijų katedra

http://leidykla.vgtu.lt
VGTU leidyklos „Technika“ 1230-S mokomosios metodinės literatūros knyga

ISBN 978-9955-28-942-5
eISBN978-9955-28-943-2
doi:10.3846/1230-S

© Eugenijus Pileckas, 2011
© VGTU leidykla „Technika“, 2011

TURINYS

PRATARMĖ 4

1. SKRYDŽIO PRIETAISAI 5

1.1. Oro duomenų prietaisai 10

1.2. Giroskopiniai prietaisai 68

1.3. Inerciniai įrenginiai 116

1.4. Magnetinai kompasai 121

1.5. Radijo aukščiamatis 158

2. SKRYDŽIO VALDYMO SISTEMOS 163

2.1. Elektroninė skrydžio prietaisų sistema 163

2.2. Skrydžio valdymo sistema (FMS) 169

2.3. Komandinė skrydžio valdymo sistema 181

2.4. Automatinė skrydžio valdymo sistema (AFCS) 191

2.5. Automatinio tūpimo sistema 206

2.6. Traukos valdymo sistemos 211

2.7. Įspėjamieji ir registracijos įrenginiai 218

3. VARIKLIŲ PARAMETRŲ MATAVIMO PRIETAISAI 243

3.1. Termometrai 243

3.2. Manometrai 257

3.3. Tachometrai 264

3.4. Degalų ir tepalų debitometrai 273

3.5. Vibrometrai 290

3.6. Traukos matavimo prietaisai 294

3.7. Informacinė sistema EICAS 298

3.8. Informacinė sistema ECAM 302

LITERATŪRA 306

PRATARMĖ

Knygoje nagrinėjami aviacinių skrydžio valdymo prietaisų sudarymo principai, pirminiai matavimo davikliai, informacijos perdavimo ir atvaizdavimo priemonės. Aprašomi orlaivių skrydžio pirminių parametrų nustatymo aerometriniai (oro duomenų) ir giroskopiniai prietaisai, magnetiniai ir mišrieji aviaciniai kompasai, inercinės orlaivio padėties nustatymo priemonės bei jėgainės darbinių parametrų: temperatūros, slėgio, sūkių greičio, kuro sąnaudų, traukos ir vibracijų matavimo įrenginiai bei jų automatizuotos kontrolės sistemos.

Išsamiai aprašomos automatizuotos orlaivio skrydžio valdymo sistemos, nagrinėjamos jų struktūros ir veikimo algoritmai. Taip pat aprašomos informacinės, įvairios paskirties įspėjamosios sistemos, komandinio ir automatinio skrydžio valdymo sistemos, veikiančios interaktyviu bendravimo su skrydžio įgula režimu, bei skrydžio duomenų kontrolės ir registravimo priemonės.

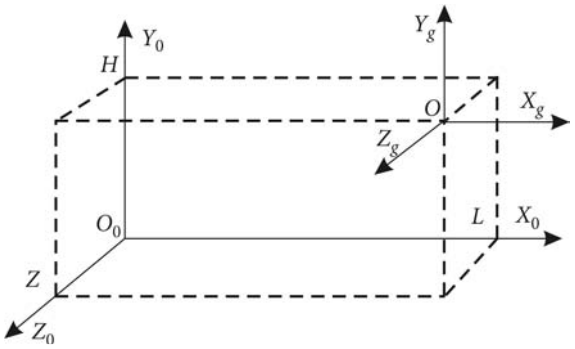
Ši mokomoji medžiaga atitinka JAR-FCL NO 022 00 00 00 standartą ir skirta orlaivių pilotavimo, skrydžių valdymo bei kitų aviacinių specialybių studentams, studijuojantiems avionikos pagrindus.

1. SKRYDŽIO PRIETAISAI

Matuojamieji parametrai ir jų klasifikavimas

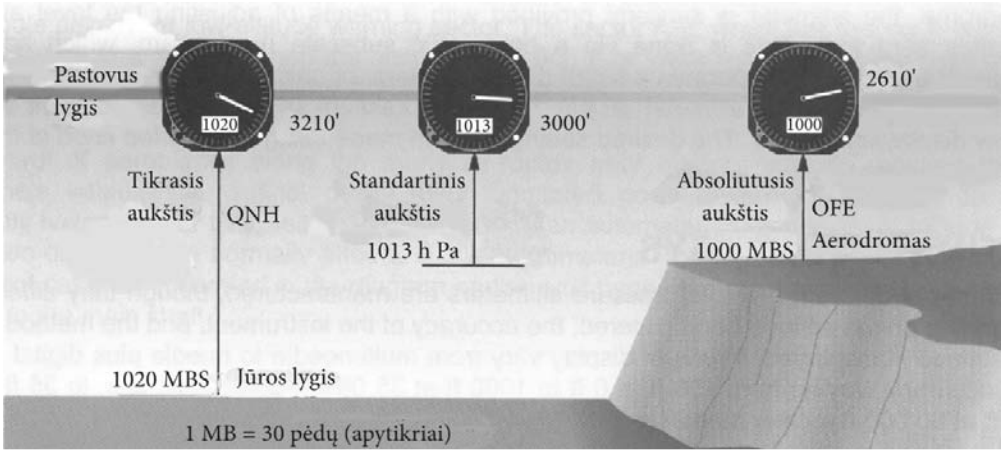
Šių aviacinių prietaisų paskirtis – matuoti orlaivio skrydžio procesą apibūdinančius parametrus. Kadangi skrydžio metu jie nuolat kinta, informacija apie matuojamųjų parametrų dydžius naudojama skrydžiui valdyti, variklių darbo režimams kontroliuoti ir orlaivį supančios aplinkos parametrams nustatyti.

Orlaivio, kaip kietojo kūno, judesys erdvėje susideda iš tiesinio judesio (masių centro judesio) ir kampinio judesio (judesio aplink masių centrą). Orlaivio masių centro (1 pav. taškas *O*) padėtis erdvėje nustatoma pagal su Žemės vietove susietos normaliosios koordinačių sistemos $O_0X_gY_gZ_g$ koordinates: *H* – skrydžio aukštį; *L* – skrydžio nuotolį; *Z* – šoninį nuokrypį.



1 pav. Orlaivio masių centro tiesinio judėjimo koordinatės

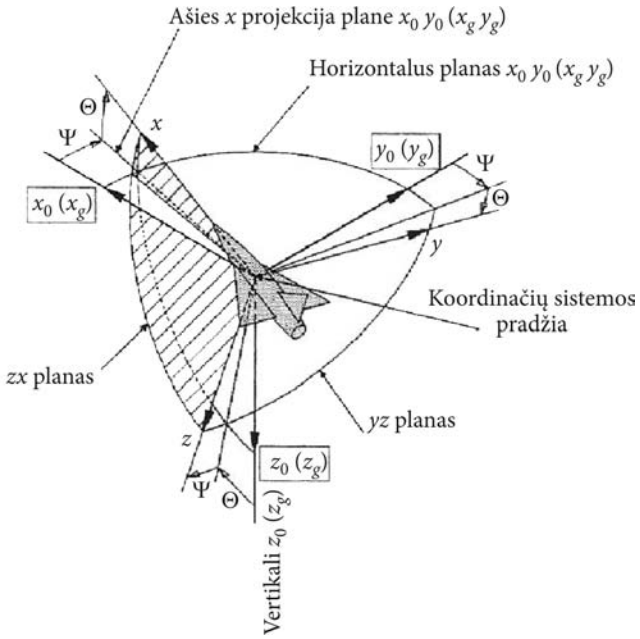
Aukštis matuojamas pagal vertikalę tarp orlaivio ir atskaitos paviršiaus Žemėje. Atsižvelgiant į pasirinktą atskaitos paviršių, skiriami absoliutusis **(*QFE*)**, tikrasis **(*QNH*)** ir standartinis **(*QNE*)** orlaivio skrydžio aukščiai (2 pav.).



2 pav. Orlaivio skrydžio aukščiai

Orlaivio kampinei padėčiai erdvėje nustatyti naudojamos normalioji $O_0X_gY_gZ_g$ ir susietoji *O X Y Z* koordinačių sistemos. Abiejų sistemų koordinačių pradžia sutampa su orlaivio masių centru (3 pav.). Normaliosios sistemos koordinačių ašys sutampa su vietos vertikaliąja ir horizontaliąja plokštumomis. Susietosios sistemos ašis *OX* nukreipta pagal išilginę orlaivio ašį (3 pav.). Ašis *OY* yra simetrijos plokštumoje ir statmena ašiai *OX*. Ašis *OZ* nukreipta į dešiniojo sparno pusę statmenai orlaivio simetrijos plokštumai.

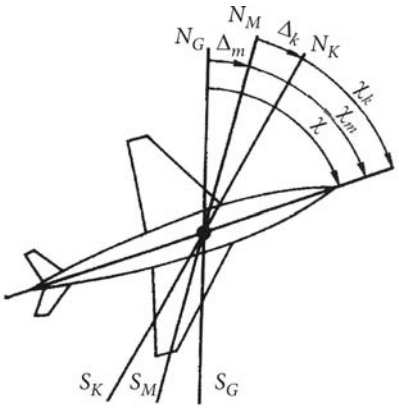
Kampinė orlaivio padėtis normaliosios koordinačių sistemos atžvilgiu nustatoma trimis Eilerio kampais (kampinėmis koordinatėmis): Ψ, Θ, Φ.



3 pav. Orlaivio kampinio judėjimo koordinatės masių centro atžvilgiu

Kampas Ψ, esantis tarp ašies OX_g ir susietosios ašies projekcijos horizontaliojoje plokštumoje X_gOZ_g, vadinamas ***azimuto*** kampu. Kampas Θ, esantis tarp susietosios ašies OX ir horizontaliosios plokštumos, vadinamas ***polinkio*** kampu. Kampas Φ, esantis tarp orlaivio simetrijos plokštumos XOY ir vertikaliosios plokštumos, praeinančios per susietąją ašį OX, vadinamas ***posvyrio*** kampu.

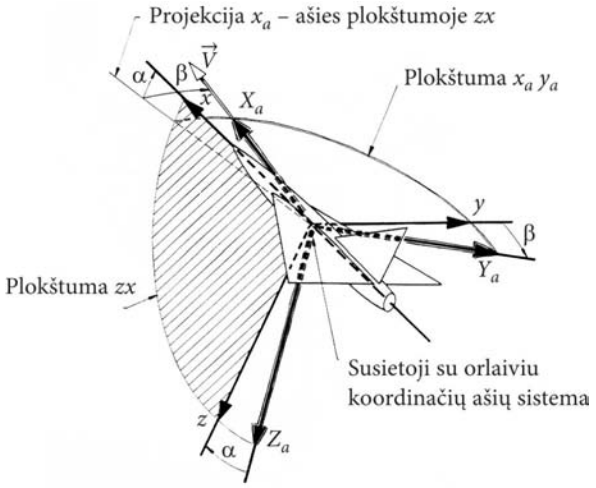
Orlaivio skrydžio kryptis normaliosios žemės koordinačių sistemos atžvilgiu nustatoma ***orlaivio kursu*** χ, kuris reiškia kampą, atskaitomą pagal laikrodžio rodyklę tarp meridiano krypties ir orlaivio išilginės ašies projekcijos į horizonto plokštumą. Pagal meridianą, naudojamą kaip atskaitymo linija (geografinis, magnetinis, kompaso), skiriami (4 pav.) tikrasis χ, magnetinis χ_m ir kompaso χ_k kursai.



4 pav. Tikrasis, magnetinis ir kompaso orlaivio kursai

Magnetinis kursas χ_m skiriasi nuo tikrojo kurso χ magnetinio poslinkio Δ_m dydžiu, o kompaso kursas χ_k nuo magnetino kurso χ_m – magnetinės deviacijos Δk dydžiu. Išskyrus tiesines (H, L, Z) ir kampines (Ψ, Θ, Φ) koordinates, matuojami parametrai, apibūdinantys ***orlaivio judėjimą priešpriešinio oro srauto*** atžvilgiu. Tam įvedama greičių koordinačių sistema $OX_aY_aZ_a$ (5 pav.), susieta su orlaivio judėjimo greičio vektoriumi $\bar{V}$ oro aplinkos atžvilgiu, vadinamuoju ***tikruoju oriniu greičiu***. Greičių koordinačių sistemos $OX_aY_aZ_a$ ašies OX_a kryptis sutampa su vektoriaus $\bar{V}$ kryptimi. Ašis OX_a statmena ašiai OZ_a ir yra vertikalioje plokštumoje, praeinančioje per ašį OX_a. Ašis OZ_a statmena plokštumai X_aOY_a ir nukreipta dešiniojo sparno link. Greičių koordinačių sistemos $OX_aY_aZ_a$ padėtis susietos koordinačių siste-

mos *OXYZ* atžvilgiu nustatoma kampais α ir β (5 pav.). Kampas α tarp tikrojo orinio greičio vektoriaus projekcijos orlaivio simetrijos plokštumoje (XOY) ir susietos ašies OX vadinamas ***atakos*** kampu. Kampas β tarp tikrojo orinio greičio vektoriaus ir orlaivio simetrijos plokštumos XOY – ***slydimo*** kampu.



5 pav. Greičių koordinačių sistema

Orlaiviams valdyti, be tikrojo orinio greičio, taip pat naudojami tokie skrydžio greičiai, kaip prietaisinis, kalibruotasis, kelio ir vertikalusis. ***Prietaisinis greitis*** V_i – tai tikrasis orinis greitis, normuotas oro tankiu masės vienete. ***Kelio greitis*** V_k – tai orlaivio judėjimo greičio horizontaliosios komponentės projekcija Žemės atžvilgiu. Esant vėjui, kelio greitis lygus tikrojo orinio ir vėjo greičių horizontaliųjų komponenčių geometrinei sumai. ***Vertikalusis greitis*** V_v – tai orlaivio judėjimo greičio vertikalioji komponentė Žemės atžvilgiu. Bedimensė orlaivio skrydžio greičio charakteristika yra ***Macho skaičius*** M, lygus tikrojo orinio ir garso greičių ore santykiui.

Siekiant reikiamos judėjimo trajektorijos valdymo kokybės, dažnai tenka matuoti tiesinių ir kampinių koordinačių išvestines: ***kampinius greičius ir pagreičius*** susietųjų ašių atžvilgiu ($\omega_x, \omega_y, \omega_z, \omega'_x, \omega'_y, \omega'_z$) bei ***tiesinį pagreitį*** j susietosios ašies kryptimi.

Variklių darbo režimai apibūdinami parametrais, nustatančiais variklio trauką P_t, santykines kuro sąnaudas G_{san}, šiluminius ir dinaminius jo detalių režimus bei darbo patikimumą. Tokiais parametrais yra: slėgio didėjimo laipsnis kompresoriuje Π_k, dujų temperatūra prieš turbiną T_3, praeinančio per variklį oro sąnaudos G_0, oro ir dujų slėgis, greitis variklio trakte ir pan.

Pagrindiniai iš minėtųjų parametrų yra dydžiai Π_k ir T_3. Kadangi darbiniuose režimuose paprastai apsiribojama sąlyga, kad Π_k = const; T_3 = const, tai esant pastoviems išorinių sąlygų parametrams dydis Π_k tampa proporcingas sūkių dažniui n per laiko vienetą. Todėl, nustatant variklio trauką bei terminę ir dinaminę jo detalių įtampą, naudojami matuojamieji parametrai n ir T_3. Šiuos parametrus galima reguliuoti, keičiant reaktyvinės tūtos plotą, kompresoriaus sparnelių nustatymo kampą, pagrindinio G_t ir forsavimo G_f kuro sąnaudas.

Kadangi prietaisų darbo sąlygos orlaivyje skiriasi nuo darbo sąlygų Žemėje dėl įvairių sudėtingai juos veikiančių skirtingų išorinių veiksnių, prie matuojamųjų orlaivyje parametrų priskiriami ir aplinkos bei mechaninių poveikių (vibracijų, perkrovų) parametrai. Aviaciniais prietaisais matuojami parametrai jungiami į tris pagrindines grupes: pilotavimo navigaciniai, variklių darbo režimų, skrydžio aplinkos parametrai.

Pilotavimo navigaciniai parametrai dar dalijami į dvi grupes: orlaivio evoliucijos ir skrydžio parametrus.

Pagrindiniai parametrai, apibūdinantys skrydžio režimus, ir jų matavimo priemonės pateiktos 1 lentelėje.

1 lentelė. Pagrindinių parametrų matavimas

Matuojamieji parametrai	Žymėjimas	Matavimo priemonė
I. Aplinkos parametrai		
Atmosferos parametrai		
tankis	ρ	tankio matuokliai
santykinis tankis	Δ_n	tankio matuokliai
temperatūra	T	termometras
slėgis	P	manometras (barometras)
drėgmė	χ	hidrometras
vėjo greitis	W	greičio matuoklis
II. Pilotavimo navigaciniai parametrai		
a) Orlaivio evoliucijos parametrai		
1. Kampai		
azimuto	Ψ	girokompasas, kurso sistema
polinkio	Θ	aviahorizontas, girovertikalė
posvyrio	Φ	aviahorizontas, girovertikalė
kurso (krypties)	χ_m, χ_k, χ_o	giroindukcinis kompasas, kurso sistema
2. Judėjimo kampai oro atžvilgiu		
atakos	α	atakos kampo daviklis
slydimo	β	slydimo kampo daviklis
3. Kampiniai greičiai ir pagreičiai		
kampinis greitis	ω	greičio giroskopas
kampinis pagreitis	ω'	diferencijavimo įtaisas
tiesinis pagreitis	j	pagreičių daviklis
perkrova	n_p	perkrovų daviklis
b) Skrydžio parametrai		
prietaisinis greitis	V_e *(IAS)*	orinio greičio indikatorius
kalibruotasis greitis	V_c *(CAS)*	orinio greičio indikatorius
tikrasis greitis	*V (TAS)*	tikrojo orinio greičio matuoklis
kelio greitis	V_k	kelio greičio matuoklis
Macho skaičius	$M = \frac{V}{C_{garso}}$	machometras
skrydžio aukštis	H, H_S, H_T	orinių signalų sistema
šoninis nuokrypis	Z	aukščio korektorius, orinių signalų sistema
skrydžio nuotolis	L	automatinis navigacinis įtaisas
III. Variklių darbo režimo parametrai		
1. Sūkių (rotoriaus, veleno, turbinos ir kt.) dažnis	n	sūkių dažnio matuoklis (tachometras)
2. Variklio temperatūra		termometrai
prieš turbiną	T_3	
po turbinos	T_4	
tepalo (alyvos)	T_t	
oro (aušinimo)	T_0	

1 lentelės pabaiga

Matuojamieji parametrai	Žymėjimas	Matavimo priemonė
3. Slėgis variklyje		manometrai
kuro	p_t	
alyvos	p_m	
po kompresoriaus	p_k	
oro turbinoje	P_0	
4. Slėgio kitimas turbinoje		
5. Kuro (alyvos) kiekis bakuose		
tūrinis	ε_t	kuro kiekio (lygio) matuokliai
svorinis	V_T	kuro masės matuokliai
6. Kuro (alyvos) sąnaudos		
debitas	G_T	debitometrai
forsuojamojo variklio	G_t	debitometrai
7. Sukimo momentas	G_f	momento matuoklis
8. Variklio trauka	P	traukos matuoklis
9. Vibracijų amplitudė ir dažnis	a_v, f_v	vibrometrai

Prietaisų tipai ir jų darbo sąlygos

Aviacinius prietaisus galima skirstyti pagal paskirtį, veikimo principą, valdymo būdą ir matuojamojo dydžio vaizdavimo būdą.

Pagal ***paskirtį*** aviaciniai prietaisai skirstomi taip:

– pilotavimo navigacinius prietaisus;
– variklių darbo kontrolės prietaisus;
– aplinkos parametrų nustatymo prietaisus;
– įvairių orlaivio sistemų ir agregatų veikimo kontrolės prietaisus.

Pagal ***veikimo principą*** prietaisai gali būti:

– mechaniniai;
– elektriniai;
– hidrauliniai;
– optiniai;
– mišrieji, pavyzdžiui, elektromechaniniai, optoelektroniniai ir pan.

Pagal ***valdymo būdą*** prietaisai gali būti:

– tiesioginiai;
– distanciniai.

Šiuolaikiniuose civilinės aviacijos orlaiviuose dažniausiai naudojami distanciniai prietaisai. Distanciniams aviaciniams prietaisams būdinga tai, kad tarp matuojamojo (kontroliuojamojo) pirminio informacijos parametro daviklio ir kontrolės rezultato indikatoriaus egzistuoja informacijos perdavimo linija.

Savo ruožtu informacijos (nuo pirminio daviklio* iki atvaizdavimo įtaiso) perdavimo linija gali būti:

– mechaninė;
– hidraulinė;
– pneumatinė;
– elektrinė;
– optinė ir pan.

* Pirminis informacijos daviklis (pirminis daviklis) – tai bet kurio matuojamojo (kontroliuojamojo) pirminio dydžio (parametro) reikšmės *x (t)* keitiklis į kito pavidalo dydį *y (t)*, patogesnį toliau naudoti.

Pagal kontroliuojamos ***informacijos pateikimo*** būdą aviaciniai prietaisai gali teikti:

– kontrolės rezultatus tiesiogiai matuojamais vienetais analogine arba skaitmenine forma;
– semantinį informacinį vaizdą, pavyzdžiui, lėktuvo siluetą ekrano žemėlapyje, grafiką, diagramą ir pan.;
– informaciją užrašais švieslentėse (šviesos skyde) arba signalinėmis lemputėmis;
– informaciją vartotojui garsiniais signalais.

Aviacinių prietaisų darbo sąlygos. Eksploatavimo metu aviacinius prietaisus veikia išoriniai veiksniai: temperatūros ir slėgio kitimas, mechaniniai smūgiai (inercinės jėgos), tiesiniai pagreičiai, vibracijos, dulkės, drėgmė.

Pagal tai, kokioje orlaivio dalyje yra aviacinių prietaisų elementai išorinio poveikio atžvilgiu, tos dalys apibūdinamos kaip:

– sekcijos (kameros) su reguliuojamąja temperatūra;
– sekcijos (zonos), kontaktuojančios su išoriniu oro srautu;
– variklių kameros; sekcijos (kameros) su nereguliuojamąja temperatūra.

Aviacinių prietaisų darbo temperatūra gali svyruoti nuo +60 °C iki –60 °C, kai kuriais atvejais siekti net +300 °C, kitimo greitis gali keistis nuo 2 °C/min ribos iki 10 °C/min ribos. Kintant prietaisų darbo temperatūrai, keičiasi ir aplinkos oro drėgmė, atsiranda kondensatas: didėjant aplinkos temperatūrai, daugėja garų, o jai staigiai mažėjant, atsiranda kondensatas (rasojimas).

Pagal ***slėgio pokyčius*** aviaciniai prietaisai turi veikti aukščiuose:

$$6000\ \text{m} - (P \approx 47\,285\ \text{Pa});\ 10\,000\ \text{m} - (P \approx 270\,353\ \text{Pa});\ 15\,000\ \text{m} - (12\,159\ \text{Pa});\ 26\,000\ \text{m} - (2027\ \text{Pa}).$$

Skrydžio metu aviacinius prietaisus veikia ***mechaninės vibracijos ir perkrovos.*** Amortizuojamiems prietaisams leistinasis vibracijų dažnis iki 2000 Hz, o neamortizuojamiems – iki 500 Hz. Perkrovos matuojamos judėjimo pagreičio a laisvojo kritimo pagreičio g santykiu. Jos sudaro nuo $5g$ ($49\,\text{m/s}^2$) iki $10g$ ($98\,\text{m/s}^2$) – smūgiai.

Aviacinių prietaisų darbo patikimumas ir veikimo laikas negendant pasiekiami įvairiais būdais, tarp jų svarbi laiku atlikta techninė priežiūra. Gaminant aviacinius prietaisus, atsižvelgiama į eksploatacines sąlygas, parenkamos tinkamos medžiagos, matavimo metodai ir pan.

1.1. Oro duomenų prietaisai

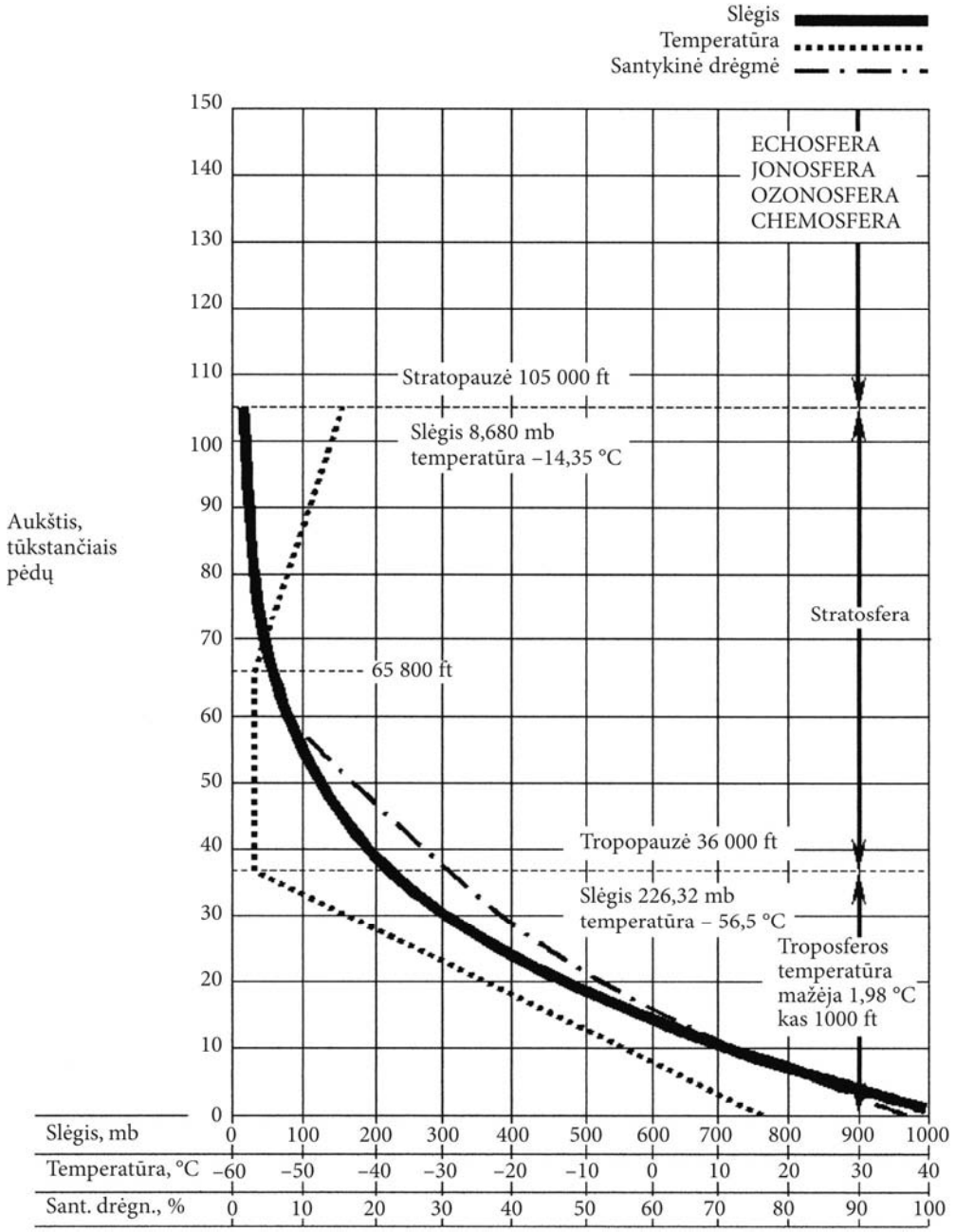
1.1.1. Aerometrijos pagrindai

Orlaiviui skrendant oro erdvėje, tokie jo skrydžio parametrai, kaip aukštis, greitis, aukščio pokyčių greitis bei orlaivio kampai skrydžio greičio vektoriaus atžvilgiu, gali būti nustatyti pagal orlaivį supančios atmosferos parametrus ir nuo skrydžio greičio, priklausančio oro dinaminio slėgio pokyčius.

Barometrinis aukščio matavimo metodas. Barometrinių oro duomenų aukščiamačių veikimas pagrįstas tuo, kad didėjant aukščiui mažėja absoliutusis oro slėgis atmosferoje. Išvedant absoliučiojo slėgio P priklausomybės nuo aukščio H formules, turi būti įvertinama atmosferos tankio ir temperatūros kitimo priklausomybė nuo aukščio. Kadangi įvairiose vietovėse skirtingu metų laiku slėgis ir temperatūra Žemės paviršiuje bei jų pokytis aukštyje yra skirtingas, matavimams taikoma sąlyginė ***atmosfera***, vadinama ***standartine***.

Nustatant aukštį Žemės atmosferoje ***barometriniu*** metodu, pagrįstu absoliučiojo atmosferos slėgio priklausomybe nuo aukščio, skiriami: ***geometrinis*** ir ***geopotencinis*** aukščiai. Abiem atvejais pagal tarptautinius standartus atskaitymo pradžia laikomas ***jūros lygis su standartinės atmosferos*** parametrais (1.1.1 pav.):

– slėgiu $P_0 = 760$ mm Hg $= 101\,325$ Pa;
– temperatūra $T_0 = 288{,}15$ K;
– tankiu $\rho_0 = 1{,}225$ kg/mm^3;
– laisvojo kritimo pagreičiu $g_0 = 9{,}80665$;
– garso greičiu $a = 340{,}294$ m/s.



1.1.1 pav. Standartinė atmosfera

Geometrinis aukštis H_g suprantamas, kaip matuojamojo taško tikrasis aukštis virš vidutinio jūros lygio, o ***geopotencinis*** aukštis H – kaip santykis tarp matuojamojo taško geopotencialo ir laisvojo kritimo pagreičio g. Nedideliems aukščiams skirtumas H ir H_g nedidelis, pvz.: H_g = 10 000 m, H = 9 984 m.

Barometriniai aukščiamačiai matuoja absoliutųjį geopotencinį aukštį, jei atskaitymo pradžia yra vidutinis jūros lygis, ir santykinį aukštį virš lygio su žinomu barometriniu slėgiu. Standartinėje atmosferoje vidutinis temperatūros kitimas, kylant iki 11 000 m aukščio, vertinamas pagal temperatūrinį aukščio gradientą τ_a = 0,0065 K/m. Ši temperatūros priklausomybė nuo aukščio turi pavidalą:

$$T = T_0 - \tau_a H. \tag{1.1.1}$$

Aukščiuose nuo 11 000 m iki 20 000 m temperatūra T nekinta ir lygi 216,65 K, o dar didesniuose aukščiuose keičiasi pagal ypatingą dėsnį. Tokiu atveju standartinė ***barometrinė*** formulė matuojamojo aukščio diapazonui iki 11 000 m bus:

$$P = P_0\left[1-\frac{\tau_a}{T_0}H\right]^{\frac{g_0}{\tau_a R_s}}, \tag{1.1.2}$$

čia P_0, T_0, ρ, g_0 – standartinės atmosferos parametrai: slėgis, temperatūra, tankis ir laisvojo kritimo pagreitis; τ_a = 0,0065 K/m – temperatūrinis aukščio gradientas; R_s = 287,053 J/(kg K) – santykinė dujų pastovioji orui.

Didesniems aukščiams, nuo 11 000 m iki 20 000 m, standartinė barometrinė formulė turi tokį pavidalą:

$$P = P_{11}e^{-\frac{g_0(H-H_{11})}{R_s T_{11}}}, \tag{1.1.3}$$

čia P_{11} = 22 632 Pa – slėgis aukštyje H_{11}; T_{11} = 216,65 K.

Iš barometrinių formulių, išsprendus jas aukščio H atžvilgiu, gaunamos standartinės hipsometrinės (gr. *hipsos* aukštis + *metreo* matuoju) formulės.

Standartinės hipsometrinės formulės aukščiui matuoti atrodo taip:

$$H = \frac{T_0}{\tau_a}\left[1-\frac{P}{P_0}^{\frac{\tau_a R_s}{g_0}}\right], \text{ kai } H \le 11\,000 \text{ m, ir} \tag{1.1.4}$$

$$H = H_{11} + \frac{R_s T_{11}}{g_0}\ln\frac{\rho_{11}}{P}, \text{ kai } 11\,000 < \text{H} \le 20\,000 \text{ m.}$$

Žinant P_0T_0 arba $P_{11}T_{11}$, aukštį galima matuoti kaip ***slėgio*** funkciją.

Kai kuriuose aukščiamačiuose naudojamos ***apytikrės Laplaso*** hipsometrinės formulės, kuriose temperatūra T skrydžio aukštyje keičiama oro stulpelio su aukščiu H vidutine temperatūra, nustatoma pagal išraišką:

$$T_v = \frac{T_0 + T}{2}, \text{ kai } H \le 11\,000 \text{ m;} \tag{1.1.5}$$

$$T_v = T_{11}\frac{T_0 - T_{11}}{2}\frac{H_{11}}{H}, \text{ kai } 11\,000 \text{ m} - < H \le 20\,000 \text{ m.}$$

Laplaso (apytikrės) barometrinės formulės atrodo taip:

$$P = P_0 \exp-\left(\frac{g_0 H}{R_s T_v}\right), \text{ kai } H \le 11\,000 \text{ m;} \tag{1.1.6}$$

$$P = P_0 \exp-\left\{\frac{2H^2 g_0}{R_s\left[\left(T_0 - T_{11}\right)H_{11} + 2T_{11}H\right]}\right\}, \text{ kai } 11\,000 \text{ m} < H \le 20\,000 \text{ m.}$$

Šiuo atveju hipsometrinės formulės bus:

$$H = \frac{R_s}{g_0}T_v \ln\frac{P_0}{P}, \text{ kai } H \le 11\,000 \text{ m;} \tag{1.1.7}$$

$$H = \frac{R_s}{g_0}\left(T_{11} + \frac{\left(T_0 - T_{11}\right)}{2}\frac{H_{11}}{H}\right)\ln\frac{P_0}{P}, \text{ kai } 11\,000 \text{ m} \le \text{H} < 20\,000 \text{ m.} \tag{1.1.8}$$

Standartinės atmosferos parametrai, apskaičiuoti pagal anksčiau pateiktas formules, pateikiami lentelėse bei grafikuose (1.3.1 pav.) ir naudojami graduojant matavimo prietaisus.

Orinio greičio matavimo metodas. Orlaivio skrydžio greičiui matuoti taikytinas ***aerometrinis*** metodas, pagrįstas nuo skrydžio greičio priklausančio dinaminio oro slėgio matavimu. Matematinės formulės ekvivalentiniam ***(prietaisiniam) oriniam greičiui*** nustatyti gali būti išvedamos iš Bernulio lygties, kuri horizontaliojo nespūdžiosios aplinkos oro srautui yra:

$$\frac{V_1^2}{2}+\frac{P_1}{\rho_1}=\frac{V_2^2}{2}+\frac{P_2}{\rho_2}, \tag{1.1.9}$$

čia $V_1 = V$ – netrikdomai tekančio srauto greitis; $P_1 = P$ – statinis slėgis tekančiame sraute; P_2 – slėgis; ρ_1 – oro tankis tekančiame sraute; V_2 – greitis; ρ_2 – oro tankis orlaivio išorėje.

Taigi orlaivio greičių matavimams realizuoti skrydžio metu į matavimo prietaisus turi būti tiekiamas išorinis atmosferos statinis slėgis P_1 ir pilnutinis oro pasipriešinimo orlaiviui slėgis P_2. Tai atliekama įrengiant orlaiviuose specialią pilnojo ir statinio slėgio tiekimo sistemą, vadinamąją Pito-statinę slėgio sistemą.

Jei orlaivio pilnutinio slėgio imtuvas, į kurį skrydžio metu patenka išorinio oro srautas, yra aptakaus vamzdžio pavidalo, tai jame tam tikroje vietoje dinaminiai srauto parametrai V_2, ρ_2, P_2 taps pastoviais dydžiais.

Tokia vieta imtuve vadinama kritiniu tašku. Šiame taške santykinis oro srauto greitis sumažėja iki nulio, ir nusistovi pilnutinis slėgis P_p, lygus statinio slėgio P ir srauto dinaminio slėgio $\frac{\rho V^2}{2}$ sumai. Srautą stabdant ($V_2 = 0$):

$$\frac{V_1}{2}+\frac{P_1}{\rho_2}=\frac{P_2}{\rho_2}. \tag{1.1.10}$$

Šiuo atveju $P_2 = P_p$, o kadangi tariame, kad aplinka yra nespūdi, tai $\rho_1 = \rho_2 = \rho$. Tada:

$$P_p - P = P_{din} = \rho\frac{V^2}{2}. \tag{1.1.11}$$

Dydis $P_{din} = \rho\frac{V^2}{2}$ vadinamas dinaminiu slėgiu ir apibūdina nuo įtekančio į imtuvą oro greičio priklausantį slėgį. Praktikoje iš slėgio imtuvo perduodamų slėgių skirtumas $P_p - P$ skiriasi nuo dydžio $\frac{\rho V^2}{2}$ ir priklauso nuo imtuvo konstrukcijos tobulumo. Todėl matuojant P_{din} taikomas šią nelygybę išreiškiantis vadinamasis ***imtuvo koeficientas*** $\xi_{ėm}$. (1.1.10) lygtis tampa:

$$P_{din} = \xi_{ėm}\rho\frac{V^2}{2}. \tag{1.1.12}$$

Koeficientas $\xi_{ėm}$ kinta nuo 0,98 iki 1,02 ir nusako imtuvo gamyklinį tikslumą. Įvertinus oro erdvės spūdumą, (1.1.10) lygtis tampa:

$$\frac{V_1^2}{2}+\frac{k}{k-1}\cdot\frac{P_1}{\rho_2}=\frac{k}{k-1}\cdot\frac{P_2}{\rho_2}, \tag{1.1.13}$$

čia $k = 1{,}4$ – oro adiabatinis rodiklis (kai srautas stabdomas be šilumos mainų su aplinka, t. y. $\rho_1 \neq \rho_2$).

Slėgiai P_1 ir P_2, tankiai ρ_1 ir ρ_2 susieti adiabatės lygtimi:

$$\frac{\rho_1}{\rho_2}=\left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{1}{k}}. \tag{1.1.14}$$

Taikant dujų būsenos lygtis $\frac{P}{\rho_1} = R_s T$ ir turint omenyje dvi paskutines išraiškas, pažymėjus $V_1 = V$; $P_1 = P$; $P_2 = P_p$, galima gauti, kai $M \le 1$:

$$P_p = P\left(1 + \frac{(k-1)}{2kR_sT}V^2\right)^{\frac{k}{k-1}}, \text{ arba} \tag{1.1.15}$$

$$P_{din} = P_p - P = P\left\{\left[\frac{(k-1)}{2kR_sT}V^2 + 1\right]^{\frac{k}{k-1}} - 1\right\}$$

(1.1.15) lygtis apibūdina dinaminį slėgį, įvertinus oro spūdumą, skrydžio greičių diapazone nuo 200 km/val. iki garso greičio ore *a*. Kai skrydžių greičiai didesni už garso greitį ($V > a$), priklausomybė P_{din} nuo V (skaičiais $M = \frac{V}{a}$) nustatoma pagal formulę:

$$P_{din} = p\left\{\left[\frac{(k+1)}{2}M^2\right]^{\frac{k}{k-1}}\left[\frac{k+1}{2kM^2 - (k-1)}\right]^{\frac{1}{k-1}} - 1\right\}. \tag{1.1.16}$$

Indikatorinio greičio V_i nustatymo formulėse oro tankis laikomas pastoviu ir lygiu tankiui ρ_0 normaliomis standartinėmis sąlygomis.

Remiantis (1.1.15) lygtimi, galima gauti ***indikatorinio greičio*** matavimo prietaisų veikimo algoritmo formulę:

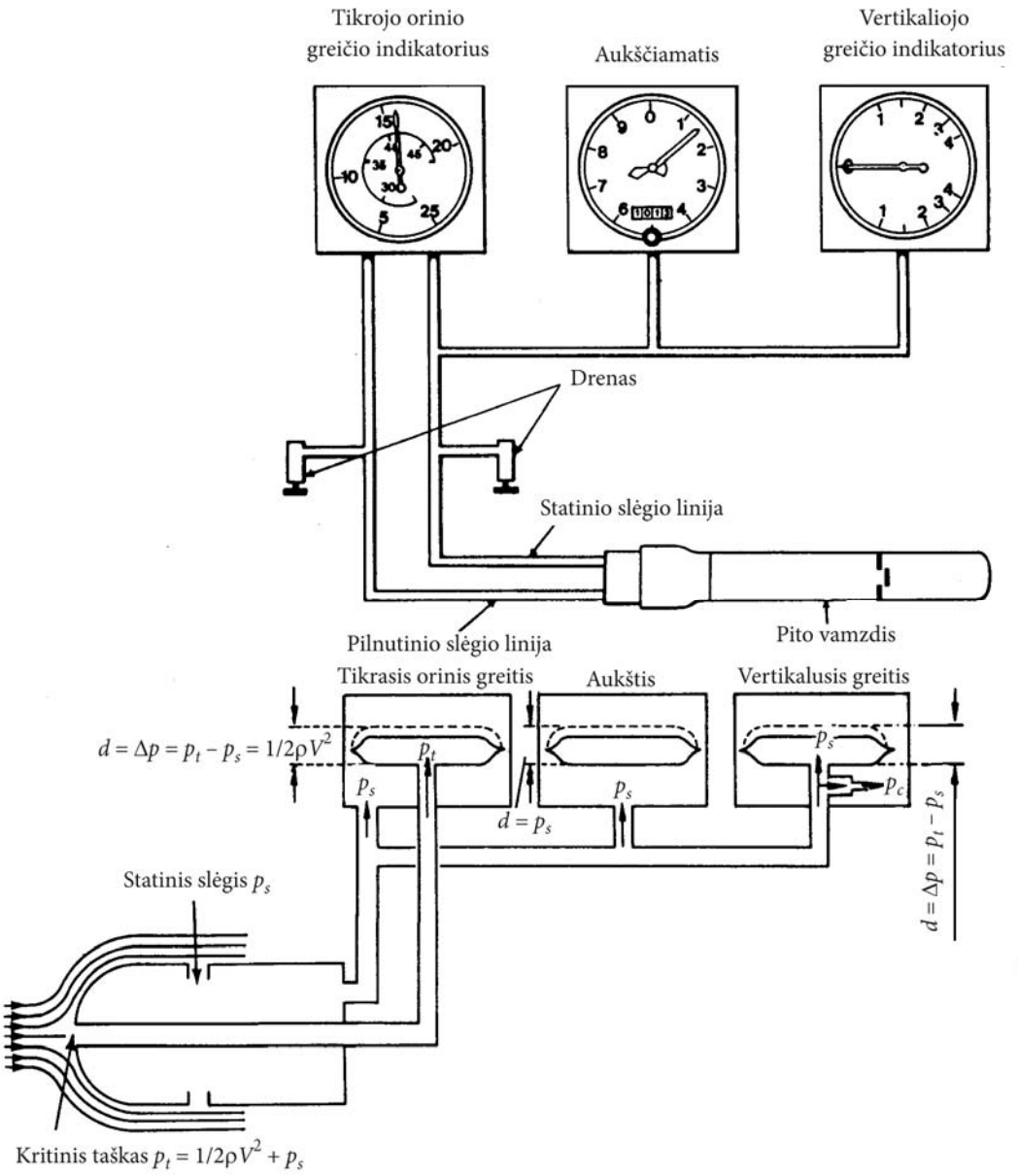
$$V_i = \sqrt{2R_sT_0\left(\frac{k}{k-1}\right)\left[\left(\frac{P_{din}}{p_0} + 1\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right]}. \tag{1.1.17}$$

Taigi, siekiant išmatuoti indikatorinį orinį greitį V_i, reikia nustatyti slėgių P_p ir P skirtumą, lygų dinaminiam slėgiui P_{din}.

Aviaciniai prietaisai, atliekantys matavimus pagal orlaivį supančio oro duomenis, vadinami aerometriniais, arba ***oro duomenų prietaisais*** (1.1.2 pav.).

Oro duomenų prietaisams sudaryti naudojami orlaivį supančio oro parametrai: statinis atmosferos slėgis ir orlaiviui skrendant atsirandantis pilnutinis oro pasipriešinimo slėgis. ***Pilnutinis*** (Pito) P_p ir ***statinis*** P slėgiai į svarbiausius skrydžio parametrų matavimo prietaisus (1.1.2 pav.) (orinio greičio indikatorių, aukščiamatį ir vertikaliojo greičio indikatotrių) patenka per orinių slėgių imtuvus ir pneumolaidžius, sudarančius šių prietaisų oro duomenų parametrų tiekimo sistemos pagrindą.

Dinaminio slėgio vertė, proporcinga oriniam greičiui, nustatoma indikatoriuje (1.1.2 pav.), nes į aneroidinės dėžutės vidų tiekiamas pilnutinis slėgis P_p, o į jos išorę – statinis atmosferos slėgis P. Šis orlaivio greitis vadinamas indikatoriniu oriniu greičiu. Matuojant statinį slėgį, aukščio indikatoriaus barometrine dėžute nustatomas barometrinis skrydžio aukštis, o sekant jo pokytį laike vertikaliojo greičio indikatoriuje, nustatomas vertikalusis orlaivio greitis.

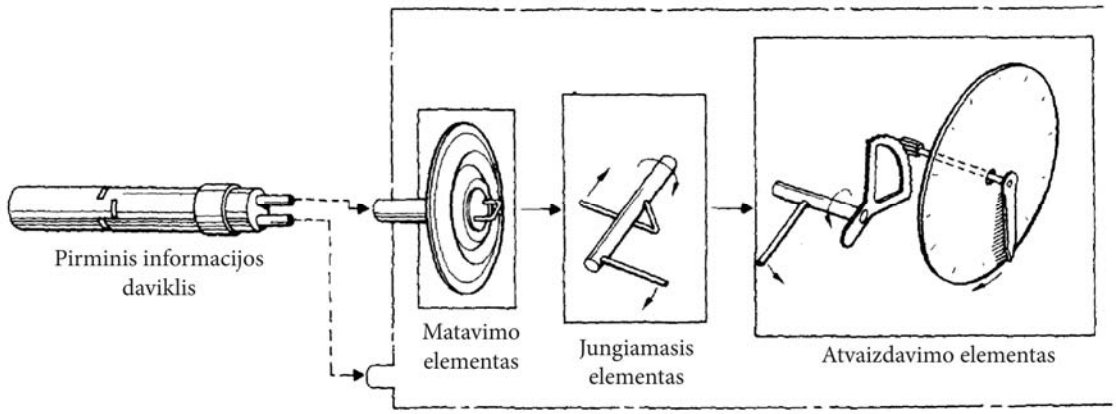


1.1.2 pav. Aerometrinių matavimo prietaisų sandara

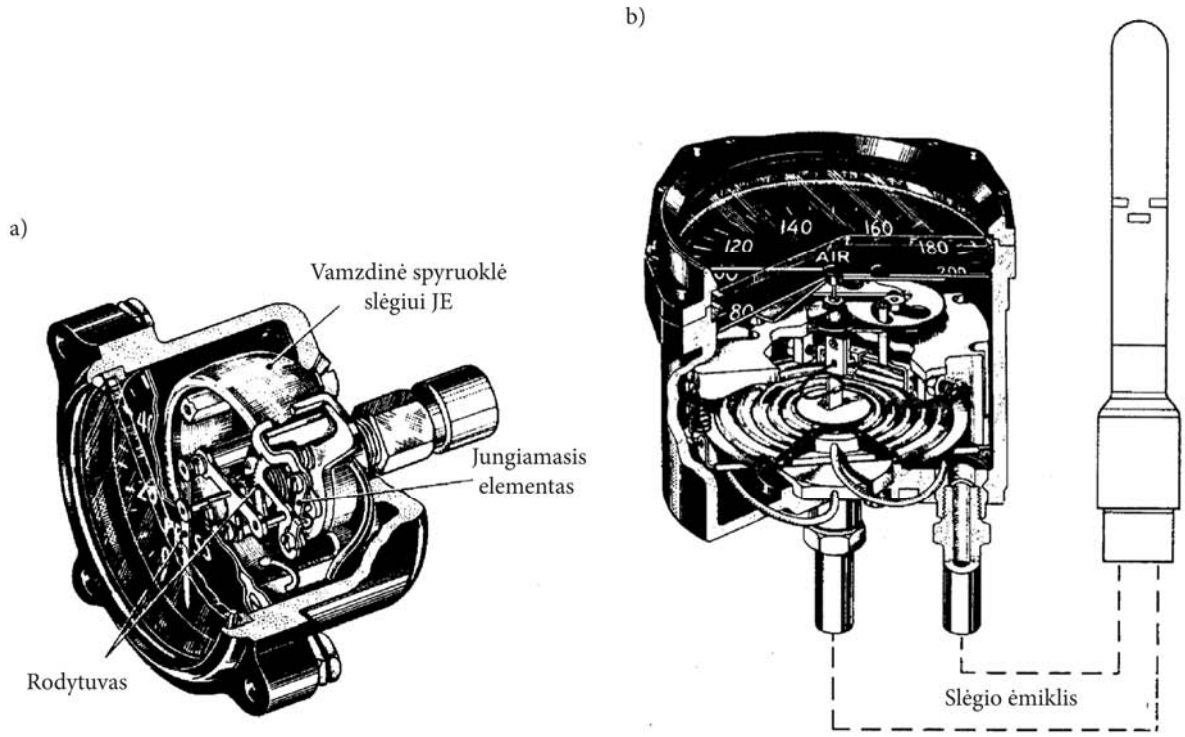
1.1.2. Oro duomenų prietaisų elementai ir mechanizmai

Sisteminiu požiūriu oro duomenų prietaisai gali būti skaidomi į keturis pagrindinius funkcinius elementus: ***pirminį informacijos daviklį***, kuris reaguoja į matuojamą parametrą ir keičia jį į tam tikro fizikinio dydžio reikšmę ar patogesnį matavimams pavidalą; ***matavimo elementą***, kuris faktiškai seka fizikinio dydžio reikšmes laike, keisdamas jas į kintamąjį elektrinį signalą arba nedidelių tiesinių arba kampinių mechaninių poslinkių seką; ***jungiamąjį elementą***, kuris tuos signalus arba mechaninius poslinkius stiprina ir perduoda; ***atvaizdavimo elementą***, kuris pateikia matuojamojo dydžio reikšmes vartotojui patogia forma, keisdamas jungiamojo elemento išėjimo parametrus į tam tikrą rodyklės ar indekso padėtį matavimo skalės atžvilgiu. Šių keturių matavimo prietaisų elementų tarpusavio ryšys parodytas 1.1.3 pav.

Daugeliu atvejų kelių tipinių mechanizmų ir elementų derinys viename korpuse sudaro specializuotą aviacinį prietaisą (1.1.4 pav., a).



1.1.3 pav. Apibendrinta matavimo prietaiso struktūra



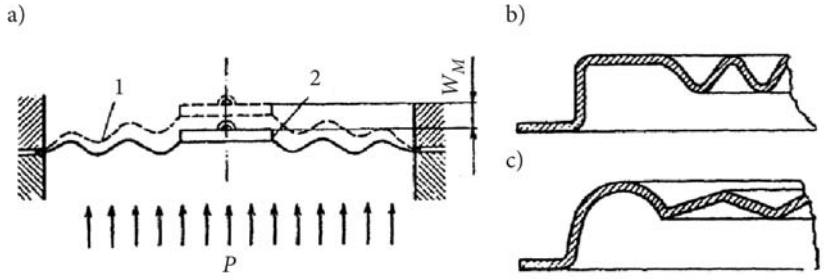
1.1.4 pav. Orinio greičio indikatoriaus sandara: a – slėgio matavimo ir indikacijos mechanizmas; b – visus dedamuosius elementus jungiantis orinio greičio indikatorius

Slėgio matavimo elementai

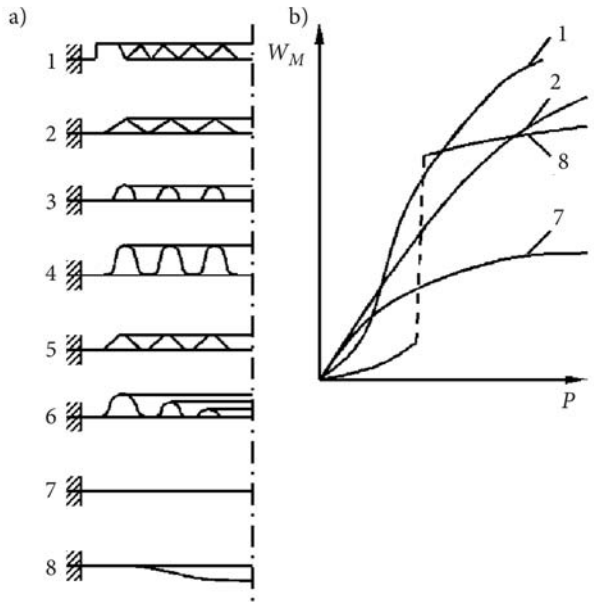
Slėgiui matuoti naudojami tokie mechaninei įtampai jautrūs elementai (JE): membranos, membraninės dėžutės, silfonai ir vamzdinės spyruoklės.

Membranos ir membranines dėžutės. Membranos naudojamos slėgiui matuoti nuo 10^2 iki 10^8 Pa diapazone. Membrana – tai plona plokštelė 1, įtvirtinta išorinio kontūro briauna, kuri veikiant slėgiui deformuojasi žymiais deformacijų poslinkiais W_M (1.1.5 pav, a). Membranos būna plokščiosios ir gofruotosios. Gofruotosios membranos paviršiuje turi simetrines bangos pavidalo klostes – gofras.

Membranos deformacijoms W_M padidinti (apie 3 kartus) ir reikiamai priklausomybei $W_M = f(P)$ sudaryti kraštinis gofras daromas trapecijos (b) arba cilindro (c) pavidalo. Membranos ***centre*** daroma plokščia aikštelė, prie kurios lituojamas arba kitaip tvirtinamas standusis centras 2 (1.1.5 pav., a), naudojamas membranai sujungti su jungiamuoju elementu (mechanizmu). Parenkant gofrų profilį (1.1.6 pav.), galima gauti norimą $W_M = f(P)$.



1.1.5 pav. Membrana (a) ir kraštinio gofro pavyzdžiai (b, c)



1.1.6 pav. Pagrindiniai membranų profiliai (a) ir kai kurios jų charakteristikos (b):
1 – pjūklo formos su cilindriniu kraštiniu gofru; 2 – pjūklo formos; 3 – plokščiai lankinis;
4 – sinusoidės pavidalo; 5 – trapecijos pavidalo; 6 – kintantis pagal gylį; 7 – plokščiasis; 8 – iškilusis

Veikiant slėgiui membranos paviršiuje, atsiranda jėga, vadinama įtempimo jėga *Q*. Jai nustatyti naudojamas parametras ***efektyvusis plotas:***

$$S_{rf} = \frac{dQ}{dP_m}.$$

Tiesinės charakteristikos ribose S_{ef} – const. S_{ef} priklauso nuo membranos profilio ir formos. Pavyzdžiui, gofruotai membranai:

$$S_{ef} \approx \frac{\pi\left(R^2 + rR + r^2\right)}{3}, \tag{1.1.18}$$

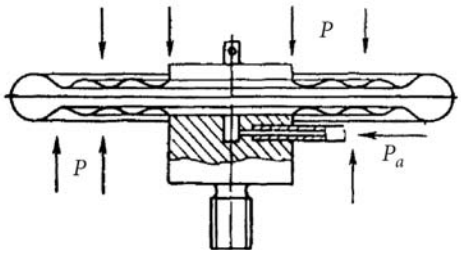
čia *R* – darbinis (diafragmos) membranos spindulys; *r* – standžiojo centro spindulys.

Jei dvi membranas hermetiškai sutvirtintume briaunomis, gautume ***membraninę dėžutę*** (1.1.7 pav.). Tiekiant į dėžutės vidų slėgį P_a, pagal deformacijas galima nustatyti:

$$P_m = P_a - P,$$

čia P_m – matuojamasis slėgis; P_a – atraminis slėgis; *P* – išorėje veikiantis slėgis.

Jei išsiurbtume iš tokios dėžutės orą, gautume ***aneroidinę dėžutę,*** matuojančią absoliutųjį slėgį.

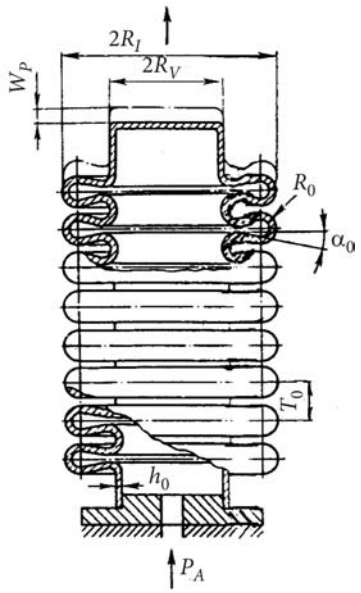


1.1.7 pav. Membraninė dėžutė

Sujungę keletą membraninių dėžučių, gautume membraninių ***dėžučių bloką. Membraninės dėžutės*** ir blokai naudojami slėgiui matuoti iki 3×10^5 Pa.

Aviacijoje naudojamų membranų storiai būna 0,005–2 mm, skersmuo – 20–100 mm. Centro poslinkio (deformacijos) dydis – 0,5–2 mm. Standžiojo centro skersmuo – 0,1–0,4 mm membranos atžvilgiu. Membranoms gaminti naudojamas plienas, berilio ir fosforinė bronza bei kitos medžiagos.

Silfonai atrodo kaip ***gofruoti vamzdžiai***, panašūs į membranų blokus su tuščiu viduriu (1.1.8 pav.). Jie paplitę dėl gaunamų didelių deformacinių poslinkių, kintant slėgiui.



1.1.8 pav. Silfonas

Silfonai gali būti gaminami tempiant iš ištisinio metalo ir jungiant iš atskirų žiedų. Pastarieji gali turėti gilesnius gofrus, todėl jautresni slėgio pokyčiams ΔP. Be to, svarbu, kad būtų vienodi jų elementų storiai.

Silfonui efektyvusis plotas

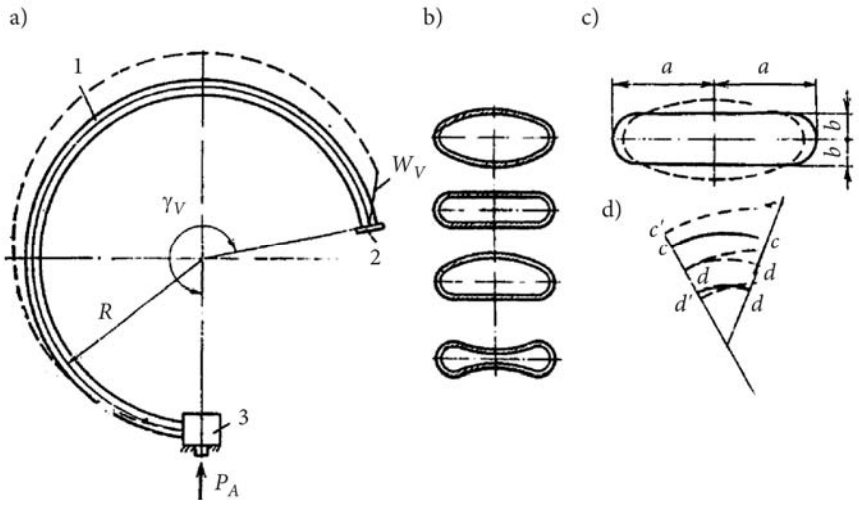
$$S_{ef} = \pi R_{vid}^2 = \frac{1}{4}\pi\left(R_I + R_V\right)^2, \tag{1.1.19}$$

čia $R_I, R_V -$ išorinio ir vidinio silfono kontūrų spinduliai.

Traukos jėga manometriniam slėgiui: $Q = P_m \times S_{ef}$.

Praktikoje naudojami silfonai turi iki 40 gofrų, išorinis jų spindulys R_I nuo 4 mm iki 75 mm, storis h – nuo 0,1 mm iki 0,3 mm.

Vamzdinės spyruoklės gaminamos iš ***plonasienių kreivų vamzdelių*** su ištemptu skersiniu pjūviu: elipsinės, ovalinės ar sudėtingesnės formos (1.1.9 pav., a, b). Vamzdinė spyruoklė daroma taip, kad lenkimo plokštumoje atsirastų mažoji pjūvio ašis.



1.1.9 pav. Vamzdinė spyruoklė: a – spyruoklės išlinkimo schema;
b – spyruoklės skerspjūvių formos; c – skersinio pjūvio deformacijos

Slėgis P_a perduodamas į vamzdžio vidų per atvamzdį *3*. Laisvasis vamzdžio galas uždengiamas dangteliu *2*, kuris atlieka jungiamojo elemento vaidmenį su perdavimo ir dauginimo mechanizmu. Veikiant matuojamajam slėgiui, vamzdis deformuojasi ir įgauna naują padėtį (1.1.9 pav., a punktyras). Laisvojo galo su dangteliu *2* deformacinis poslinkis W_V per perdavimo ir dauginimo mechanizmą perduodamas indikatorinio prietaiso rodyklėmis. Vamzdinės spyruoklės veikimas pagrįstas tuo, kad neapvalaus pjūvio vamzdelis, veikiamas slėgio, stengiasi padidinti savo pjūvio statumą (t. y. priartėti prie apvalaus pjūvio). Veikiant slėgiui, vamzdelio pjūvio didysis pusašis *a* mažėja, o mažasis *b* – didėja. Taigi išilginis išorinis vamzdelio audinys pasislenka į didesniojo spindulio lanką, o išilginis vidinis audinys – į mažesniojo spindulio lanką. Tačiau tuo pačiu metu audiniai stengiasi išlaikyti pirminį ilgį, todėl skersinio pjūvio galas pasislenka dydžiu W_v (1.1.9 pav., a). Vamzdinės spyruoklės vadinamos ***plonasienėmis***, jei sienelės storis $h \le b$ (mažasis pusašis *b*), ir paprastomis. Aviacijoje naudojamos plonasienės vamzdinės spyruoklės (dar vadinamos jų išradėjo Bourdono vardu).

Vienos vijos vamzdinės spyruoklės galinio taško kampinis poslinkis bus:

$$\frac{\Delta\gamma_V}{\gamma_V} = P_m \frac{1-\mu_p^2}{E} \frac{R}{bh}\left(1-\frac{b^2}{a^2}\right)\frac{\alpha_V}{\beta_V+\chi^2}, \tag{1.1.20}$$

čia $\chi = \frac{Rh}{a^2}$ – pagrindinis spyruoklės parametras; *R* – pagrindinis ašies spindulys; *h* – sienelės storis; α_V ir β_V – koeficientai, priklausantys nuo vamzdelio skersinio pjūvio formos; μ_P – Puasono koeficientas; *E* – vamzdelio medžiagos stangrumo modulis.

Laisvojo spyruoklės galo tiesinis poslinkis:

$$W_v = \frac{\Delta\gamma_v}{\gamma_v} R\sqrt{\left(1-\cos\gamma_v\right)^2} + \left(\gamma_v + \sin\gamma_v\right)^2. \tag{1.1.21}$$

Įtvirtinus laisvąjį spyruoklės galą, veikiant P_m, įtvirtinimo vietoje veikia traukos momentas:

$$M_V = 24 P_m R a b\left(1-\frac{b^2}{a^2}\right)\frac{\xi_V}{\varepsilon_V+\chi}, \tag{1.1.22}$$

čia ξ_V ir ε_V – koeficientai, priklausantys nuo vamzdelio medžiagos.

Siekiant padidinti vamzdinių spyruoklių deformacinius poslinkius, naudojamos keleto vijų spyruoklės (1.1.10 pav.): spiralinės, S tipo, sraigtinės.

1.1.10 pav. Vamzdinių spyruoklių tipai:
1 – spiralinė; 2 – S tipo; 3 – sraigtinė

Dėl apribotų stangrumo savybių, būdingų realioms medžiagoms, iš kurių gaminami manometrų jautrieji elementai, pasireiškia matavimo paklaidas sukeliantys veiksniai: deformacijų ***histerezė ir tamprumo poveiksmis.***

Deformacijų histerezė – tai JE didžiausių poslinkių priešingomis kryptimis, didžiausio skirtumo ir maksimalaus poslinkio santykis, esant tam pačiam išoriniam poveikiui. Tamprumo poveiksmis – tai tampriųjų deformacijų poslinkių kitimas eksploatuojant prietaisą, esant tam pačiam slėgiui ir temperatūrai.

Mažo tikslumo prietaisuose, gaminant vamzdines spyruokles, naudojama žalvarinė ir fosforinė bronza, didelio tikslumo – berilio bronza.

Jungiamieji perdavimo ir dauginimo mechanizmai (PDM)

Šie mechanizmai naudojami membraninių dėžučių jautriojo elemento poslinkio masteliui didinti, matavimų diapazonui praplatinti. PDM veikia kartu su pavaromis (arba jų pagrindu) tam, kad reikiama trajektorija ir reikiamu tikslumu perduotų JE judesius. PDM pagal pavarų mechanizmų tipą skirstomi į alkūninius, kulisinius, perdavimo kumšteliais, pavadėliais ir krumpliaračiais.

Priklausomai nuo mechanizmo tipo PDM turi skirtingas charakteristikas ir perdavimo santykius. PDM charakteristika suprantama kaip priklausomybė tarp išėjimo parametro (kampo) α_p ir įėjimo parametro – poslinkio W: $\alpha_p = f(W)$. PDM koeficientas nustatomas santykiu: $k_{pm} = \dfrac{d\alpha_p}{dW}$.

Alkūninis perdavimas. Perdavimo funkcija aprašoma taip:

$$W = c - a\sin\left(\alpha_0 - \alpha_p\right) - \sqrt{b^2 - \left[a\cos\left(\alpha_0 - \alpha_p\right) - d\right]^2}\,, \tag{1.1.23}$$

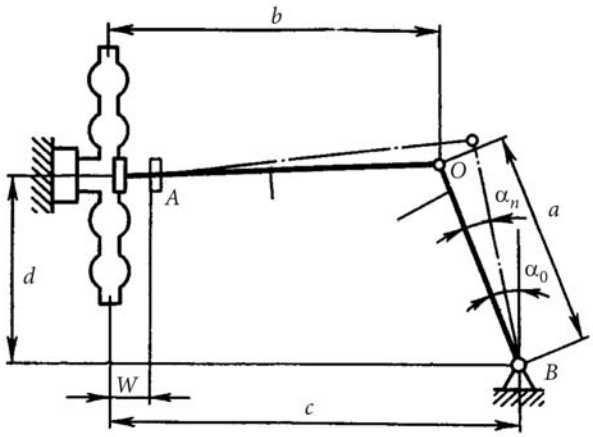
čia a, b, c, d – matmenys, parodyti 1.1.11 pav.; α_0, α_p – pradinis ir einamasis alkūninio posūkio kampai.

Kulisinis perdavimas – tai kulisėmis iš vienos ašies į kitą perduodamas sukimosi judesys (1.1.12 pav.).

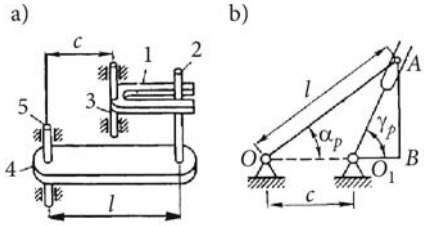
Kulisė – plokštelė *1* su išpjova, į kurią įterptas pavadėlis *2*, sukasi aplink ašį *3.* Pavadėlis *2* pritvirtintas ant svirties, kuri sukasi aplink ašį *5*. Kada ašys *3* ir *5* lygiagrečios, perdavimo funkcija bus (iš 1.1.12 pav., b trikampių OAB ir O_1AB).

$$\gamma_p = \operatorname{arctg}\frac{l\sin\alpha_P}{l\cos\alpha_P - c}\,. \tag{1.1.24}$$

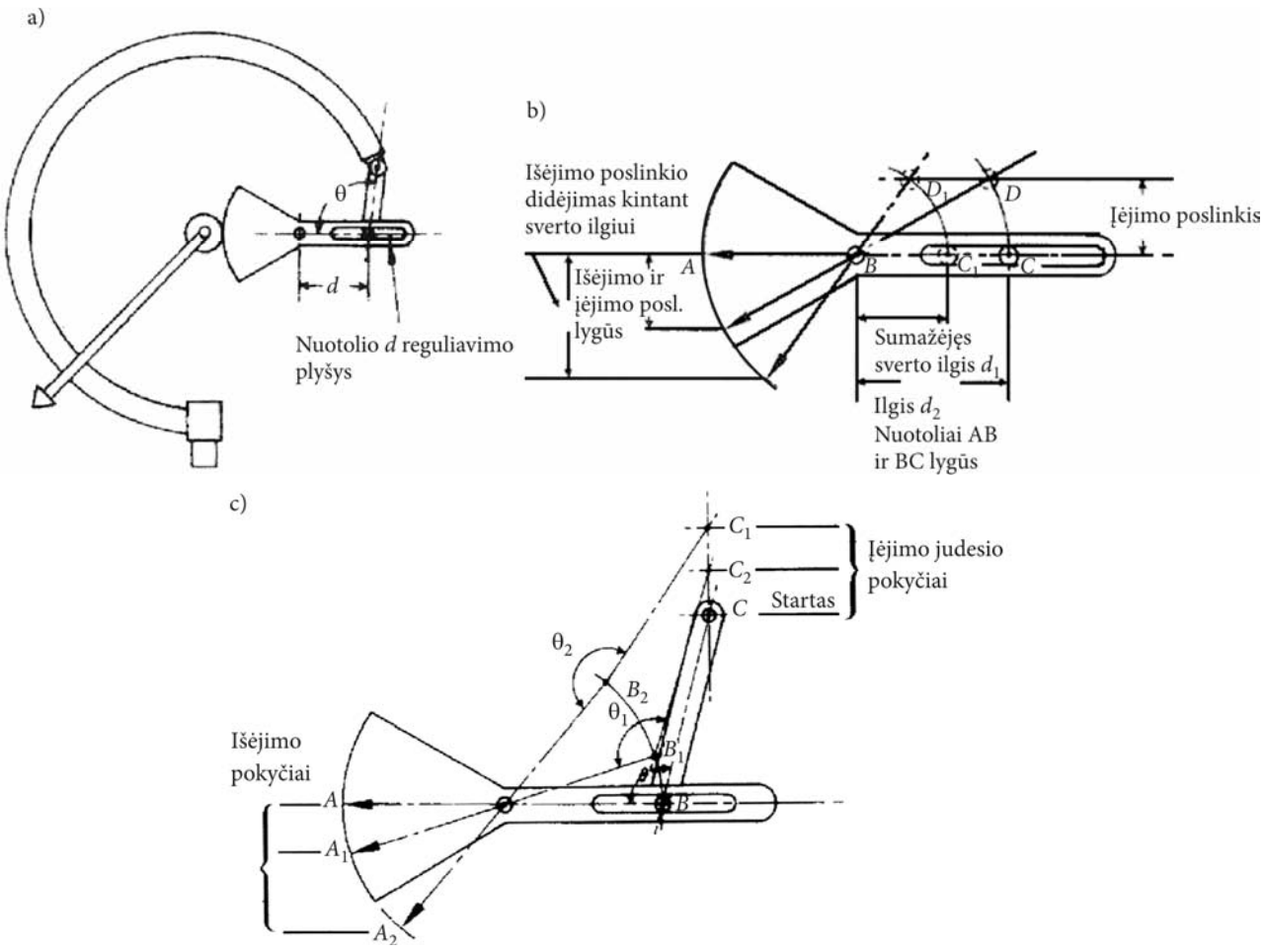
Perdavimas krumpliaračiais – tai sukimosi judesys, perduodamas krumpliaračiais iš vienos ašies į kitą. Naudojamos šios krumpliaračių pavaros: cilindrinių, tiesių, įstrižų ir kūginių – kai sukimosi ašys yra vienoje plokštumoje. Kada sukimosi ašys yra skirtingose plokštumose, naudojamos sliekinės ir sraigtinės krumpliaračių pavaros. Krumplinis diskas (diskinis krumpliaratis) kartais pakeičiamas sektoriumi, jei pavara neatlieka pilno apsisukimo. Šiuo atveju mažo skersmens krumpliaratis su mažu krumplių skaičiumi vadinamas ***tribu***. Tai leidžia supaprastinti principines slėgio matavimo schemas, gauti tolydinę matavimų skalę. Toks perdavimo krumpliaračiais svertinio tipo PDM pavyzdys su sektoriaus pavidalo krumpliaračiu ir tribu parodytas 1.1.13 pav.



1.1.11 pav. Alkūninis perdavimo ir dauginimo mechanizmas



1.1.12 pav. Kulisinis perdavimo ir dauginimo mechanizmas:
a – realizavimo būdas; b – perdavimo funkciją paaiškinanti schema

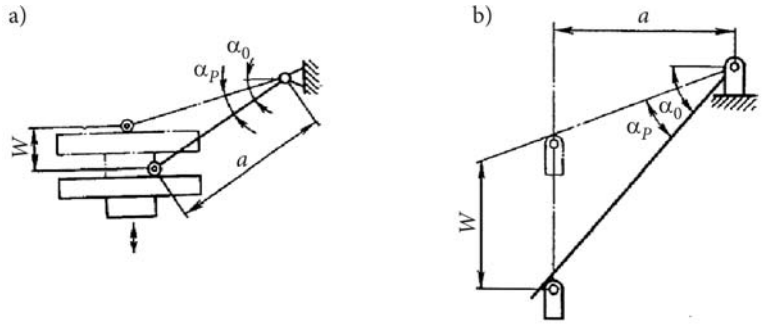


1.1.13 pav. Supaprastintas svertinio PDM veikimo principas:
a – sverto ilgio keitimo rezultatas; b – sverto kampo didinimo rezultatas

Perdavimas kumšteliais atliekamas sinuso ir tangento mechanizmais 1.1.14 pav.
Perdavimo funkcijos:

$$W = a\left[\sin\alpha_0 - \sin\left(\alpha_0 - \alpha_P\right)\right]; \tag{1.1.25}$$

$$W = a\left[\operatorname{tg}\alpha_0 - \operatorname{tg}\left(\alpha_0 - \alpha_P\right)\right].$$

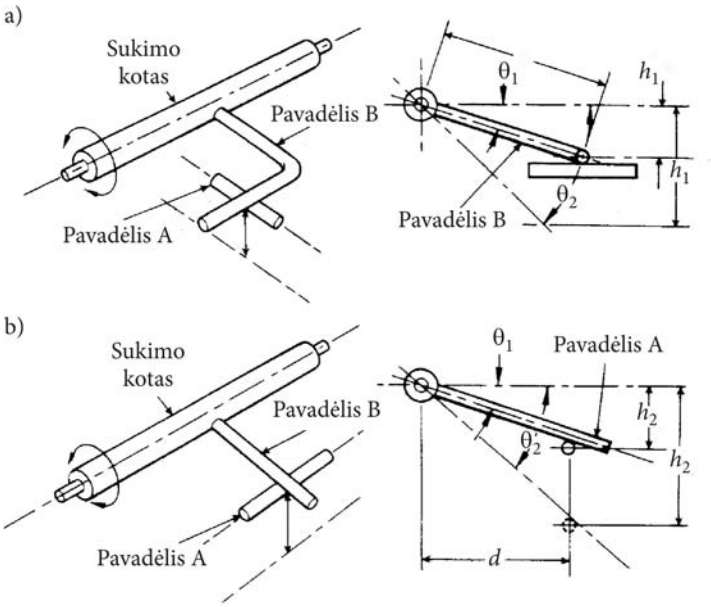


1.1.14 pav. Perdavimo ir dauginimo mechanizmas kumšteliais:
a – sinuso; b – tangento

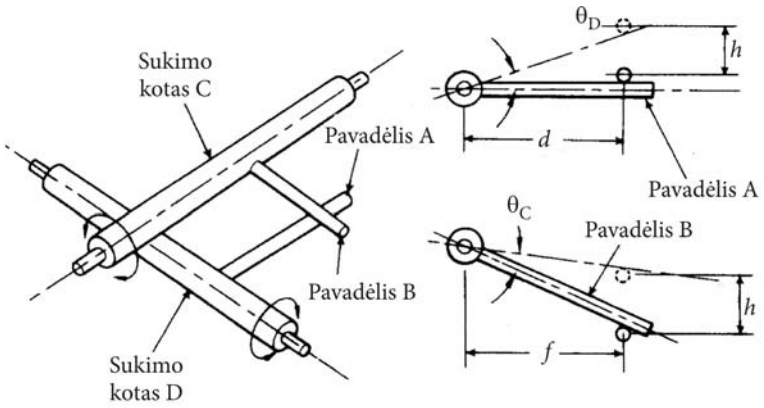
Perdavimas pavadėliais – tai sukimo iš vienos plokštumos į kitą perdavimas dviem suglaustais pavadėliais A ir B, kurie pritvirtinti prie sukimo kotų C ir D (1.1.15 pav. ir 1.1.16 pav.).
Perdavimo funkcija:

$$\beta = \operatorname{arctg}\left(\frac{d}{f}\operatorname{tg}\alpha\right), \tag{1.1.26}$$

čia d, f – matmenys, parodyti 1.1.16 pav.



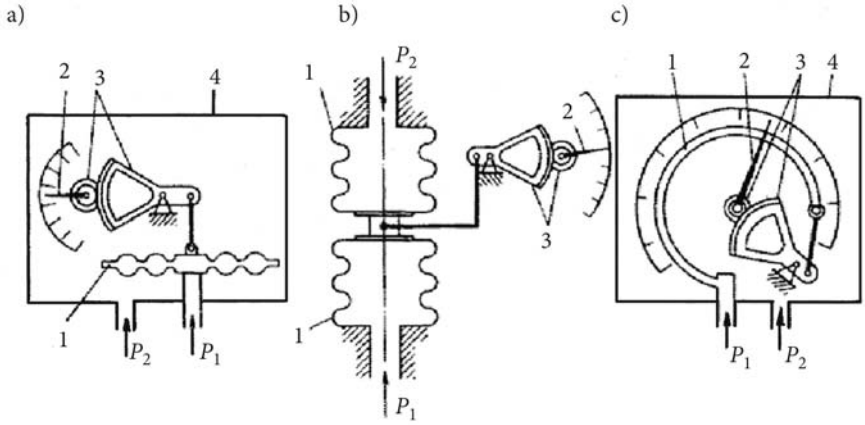
1.1.15 pav. Perdavimo ir dauginimo pavadėliais mechanizmas
su perdavimo funkcija: a – sinuso; b – tangento



1.1.16 pav. Perdavimo ir dauginimo pavadėliais mechanizmas su dvigubo tangento perdavimo funkcija

Deformacinių manometrų mechanizmai

Remiantis pateiktais slėgio matavimo ir jungiamaisiais elementais gali būti sudaromi deformacinių manometrų mechanizmai, naudojami matuojant slėgį ne tik oro duomenų prietaisuose, bet ir variklių alyvos, kuro, tepimo bei kuro tiekimo sistemose, hidraulinėse stabdžių ir aviacinių variklių paleidimo sistemose. Tokių mechanizmų principinės schemos pateiktos 1.1.17 pav.



1.1.17 pav. Principinės deformacinių diferencinių manometrų mechanizmų schemos (matuoja slėgių skirtumą P_1 ir P_2) ir elementai: 1 – matavimo; 2 – atvaizdavimo; 3 – jungiamasis

Schemoje 1.1.17 pav., a slėgis P_1 perduodamas į vidinę membraninės dėžutės *1* ertmę, o slėgis P_2 – į korpusą *4*. Standžiojo JE centro poslinkis, proporcingas slėgių P_1 ir P_2 skirtumui, per PDM *3* pasuka rodyklę *2*. Analogiškai sudaryti ***absoliutinio slėgio*** manometrai, tik vietoje atviros manometro dėžutės naudojama aklinai uždaryta aneroidinė dėžutė su išsiurbtu oru, o slėgis perduodamas į korpusą.

Schemoje 1.1.17 pav., b JE funkcijas atlieka du tarpusavyje susieti silfonai *1*, turintys lygias efektyviausias plokštumas S_{ef}. Priešingai nukreipti abiejų silfonų standieji centrai sujungti tarpusavyje. Standžiųjų centrų poslinkis, proporcingas matuojamam slėgių skirtumui $P_1 - P_2$, per PDM *3* perduodamas rodyklei *2*. Tokio tipo diferenciniam manometrui nereikia prietaiso korpuso hermetizavimo. Analogiška schema gali būti panaudota absoliutiniam slėgiui matuoti, kai iš vieno aklinai hermetizuoto silfono išsiurbiamas oras. Taip, pavyzdžiui, sudaromi vakuuminiai manometrai, naudojami matuoti absoliutiniam slėgiui aviacinio variklio įpūtimo sistemoje. Silfonų efektyviųjų plotų S_{ef} lygybė eliminuoja matavimų priklausomybę nuo supančiojo slėgio pokyčių.

Diferencinis manometras 1.1.17 pav., c veikia analogiškai kaip ir 1.1.17 pav., a.

Deformacinių manometrų ***metodinės*** paklaidos atsiranda, kai matavimo metu kinta atraminis atmosferos slėgis, o ***vadinamosios prietaiso*** paklaidos yra šios:

– ***Skalės*** paklaida – tai prietaiso skalės gradavimo paklaida, kada skalės žymės ne visai atitinka prietaiso sugradavimą. Skalės paklaidai sumažinti gali būti naudojamas ***lekalinis*** korektorius;
– ***Trinties*** paklaida atsiranda dėl trinties prietaiso mechanizmo atramose ir lankstuose. Jei santykinis, rodyklę nustatantis jėgos momentas yra nedidelis, dėl trinties rodyklė gali sustoti nereikiamoje vietoje. Paklaidos mažinamos, gerai parenkant medžiagas ir lankstus, naudojant kelių skalių ir rodyklių indikatorius. Dėl orlaivio vibracijų trinties paklaidų įtaka sumažėja;
– ***Statinio ir dinaminio nusistovėjimo*** paklaidos manometro judamojoje sistemoje mažinamos subalansuojant dinaminę sistemą specialių balansavimo spyruoklių dėka;
– Paklaidos ***dėl histerezės ir tamprumo poveiksmio*** atsiranda dėl JE medžiagos stangrumo savybių netobulumo. Histerezę ir tamprumo poveiksmį sukelia rodmenų variacija, kai $P_1 > P_2$, $P_1 < P_2$;
– ***Temperatūrinės*** paklaidos atsiranda dėl prietaiso detalių, medžiagų fizinių savybių priklausomybės nuo temperatūros.

Kadangi JE ***stangrumo modulio*** koeficientas β_E visada gerokai didesnis negu tiesinio plėtimosi koeficientas, nustatant temperatūros paklaidas, nekreipiamas dėmesys į manometro detalių geometrinių dydžių pokyčius. Pagrindinis dėmesys kreipiamas į stangrumo modulio pokyčius, kintant temperatūrai ΔT.

Tokia paklaida įvertinama taip:

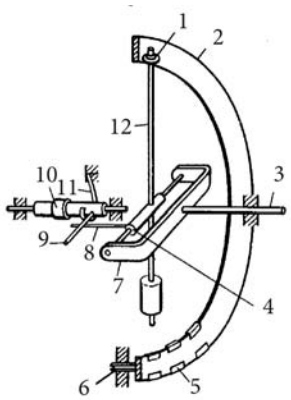
$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{\Delta E}{E} \approx \beta_E \Delta T \,. \tag{1.1.27}$$

Paklaidos mažinimos parenkant mažą stangrumo modulo koeficientą β_E turinčią JE medžiagą ir keičiant bimetaliniais terminiais kompensatoriais PDM perdavimo santykį.

Deformacinių manometrų paklaidų kompensatoriai

Deformacinių manometrų konstrukcijose prietaiso paklaidoms eliminuoti arba sumažinti naudojami specialūs mechaniniai elementai: lekaliniai korektoriai, bimetaliniai termokompensatoriai, kelių rodyklių indikacijos elementai, jų mechanizmus balansuojančios spyruoklės (pavyzdžiui, laikrodžio plaukas).

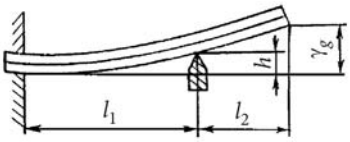
Lekalinis korektorius naudojamas aviaciniuose prietaisuose sisteminėms paklaidoms sumažinti. Jis sudaromas iš kumštelių ir sinuso pavarų. Korektorius, įvestas į tarpą tarp prietaiso JE ir išėjimo ašių, sukelia papildomą išėjimo ašies posūkį bet kuria kryptimi. Esant sisteminei paklaidai, korektorius, reguliuodamas išėjimo ašies posūkį, padeda šią paklaidą eliminuoti. Tai mechanizmas su dviem laisvumo laipsniais (1.1.18 pav.).



1.1.18 pav. Lekalinis korektorius: 1 – skridinys; 2 – juosta; 3 – velenas; 4 – ašis; 5 – apkabos; 6 – varžtas; 7 – šakutė; 8 – pavadėliai; 9 – pavadėliai; 10 – ašis; 11 – plaukas; 12 – ašis

Išėjimo ašyje *10* – sumuojasi du kampiniai poslinkiai: nuo ašies *12*, slystančios per kumštelių juostą, ir įėjimo velenėlio *3*. Juostos profilis sudaromas taip, kad galėtų būti įvedamos reikiamos pataisos. Juostos profilis reguliuojamas varžtu *6*. Kada juosta *2* neturi iškreipimo (varžtų *6* dėka) ir yra statmena veleno sukimosi ašiai, įėjimo ašies *10* posūkio kampas yra lygus veleno *3* posūkio kampui. Ašis *12* su besisukančiu ant jos skridiniu *1*, tvirtinama statmenoje ašyje *4*, kuri sukasi šakutės *7* atramose. Nuo korektoriaus judamosios sistemos ašies *10* sukimas perteikiamas pavadėliais *8* ir *9*. Plaukas *11* prispaudžia skridinį *1* prie juostos *2*. Korektoriaus juosta *2* tvirtinama apkabomis *5*. Jos profilio išlenkimas atliekamas varžtais *6*, kurie išdėstyti aplink juostą. Tai leidžia padidinti ašies *10* pasisukimo kampą papildomu nustatytu dydžiu, palyginti su kampu, kurį sudaro veleno *3* pasisukimas.

Bimetaliniai kompensatoriai naudojami temperatūros pokyčiais sukeliamoms paklaidoms kompensuoti, kai prietaiso jungiamojo elemento funkciją atlieka perdavimo ir dauginimo mechanizmas. Tokio kompensatoriaus pagrindą sudaro bimetalinė spyruoklė, sudaryta iš dviejų juostelių, pagamintų iš metalų su skirtingais tiesinio temperatūrinio plėtimosi koeficientais. Juostelės suvirinamos arba sulituojamos per visą lietimosi plokštumą (1.1.19 pav.).



1.1.19 pav. Termobimetalinė spyruoklė

Bimetalo sluoksnį su didesniu plėtimosi koeficientu vadiname ***aktyviuoju,*** su mažesniu – ***inertiniu.*** Šildant spyruoklė išsilenkia į inertinio sluoksnio pusę, šaldant – atvirkščiai. Tokiai spyruoklei jautrumo matas yra bimetalo komponentų tiesioginio ***plėtimosi koeficientų*** skirtumas. Jei vienas spyruoklės galas pritvirtintas, tai šildant (šaldant) antrasis galas pasislinks dydžiu:

$$\gamma_b = k_0 \frac{L^2}{2} \Delta V, \tag{1.1.28}$$

čia $k_0 = \frac{3}{2} \frac{\alpha_{t_1} + \alpha_{t_2}}{a_1 + b_1}$; L – spyruoklės ilgis; ΔV – temperatūros pokytis; α_{t_1}, α_{t_2} – juostelių tiesinio plėtimosi koeficientai; a_1, b_1 – jų storiai.

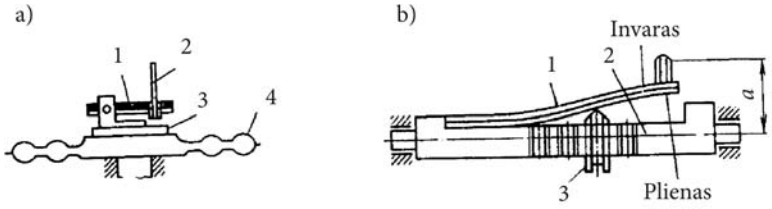
Paslenkant plokštelės atramą, maksimalusis atsilenkimas bus:

$$\gamma_b = \left(1 + \frac{3}{2} \frac{l_2}{l_1}\right) h + k_0 \left(l_2 + \frac{l_1}{2}\right) \frac{l_1}{2} \Delta V\,, \tag{1.1.29}$$

čia l_1, l_2, h – spyruoklės matmenys.

Pasyvusis elementas gaminamas iš invaro arba plieno H42, aktyvusis – iš chromo ir nikelio arba nikelio ir plieno lydinių.

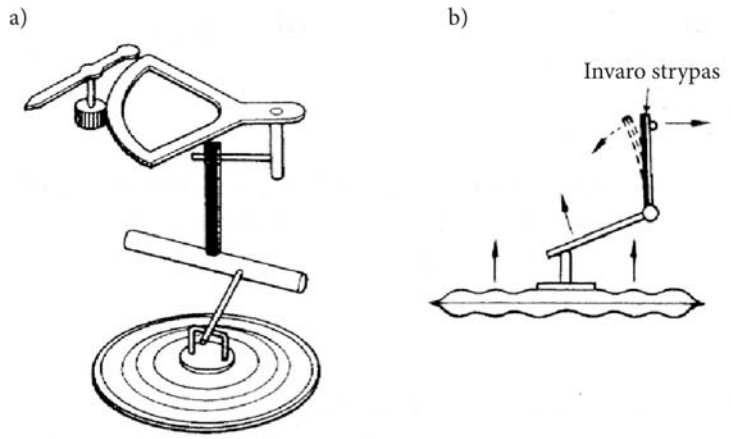
Egzistuoja bimetaliniai pirmosios ir antrosios eilės terminiai kompensatoriai 1.1.20 pav., a, b.



1.1.20 pav. Bimetaliniai terminiai kompensatoriai:
a – pirmosios eilės; b – antrosios eilės

Pirmosios eilės kompensatoriuje bimetalinė plokštelė *1* tvirtinama vienu galu prie JE *4* standžiojo centro *3*, o kitu galu – lankstu prie alkūninės pavaros traukės *2*. Antrosios eilės kompensatoriuje bimetalinė plokštelė *1* vienu galu tvirtinama ant ašies *2,* o kitu – lankstu prie traukės. Atraminis varžtas *3* reguliuoja bimetalinės plokštelės ilgį. Kompensatorius keičia alkūninio perdavimo pavaros alkūnės ilgį, kintant temperatūrai *T*. Tokiu būdu koreguojamas alkūninės pavaros perdavimo laipsnis. Korekcija atliekama keliuose ΔT intervaluose, nes visame temperatūros pokyčių diapazone sukeliamų JE poslinkių kompensuoti nepavyksta.

Bimetalinio kompensatoriaus jungimo pavyzdys tarp manometrinės dėžutės ir svertinio – krumpliaratinio PDM oro duomenų matavimo prietaise pateiktas 1.1.21 pav.

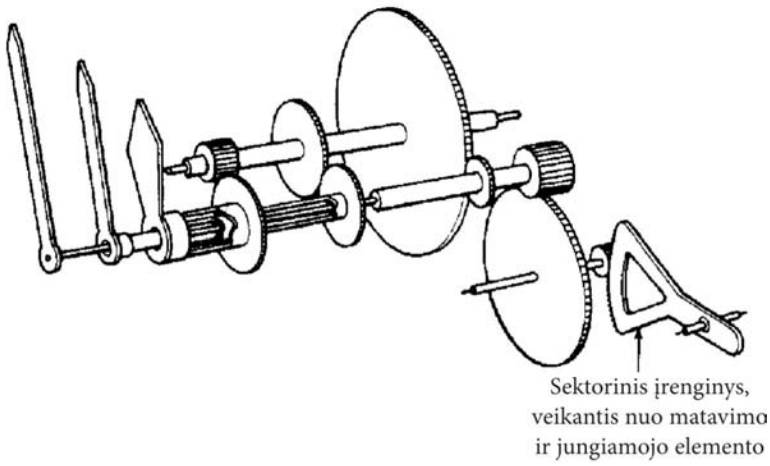


1.1.21 pav. Bimetalinio kompensatoriaus jungimo pavyzdys:
a – spyruoklė įterpta tarp matavimo ir jungiamojo elementų;
b – terminio kompensavimo principo veikimas

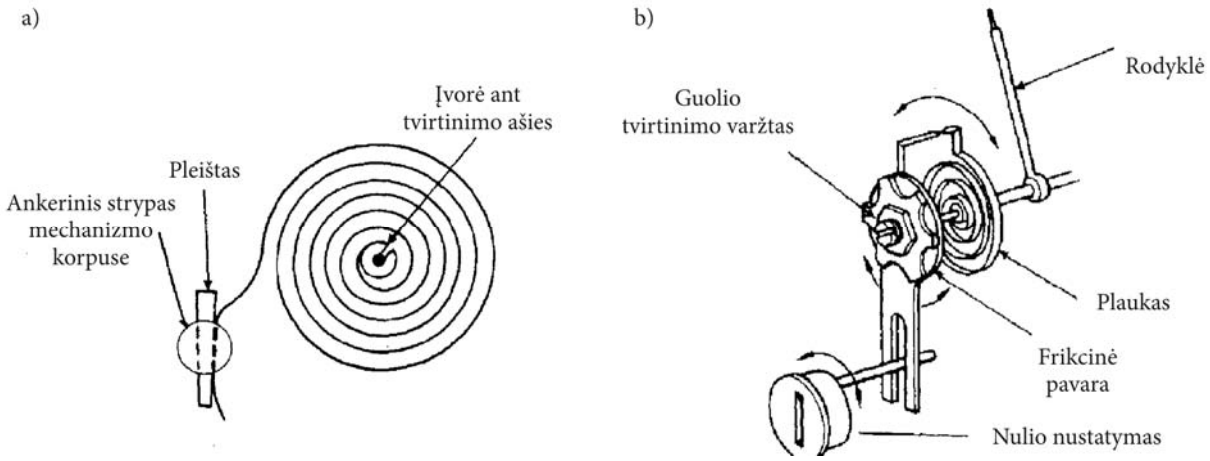
Kelių rodyklių indikacijos elementas ir jo balansavimas. Tokio tipo elementas taikomas sumažinti trinties paklaidoms, atsirandančioms dėl santykinio rodyklę nustatančio nedidelio jėgos momento (1.1.22 pav.).

Statinio ir dinaminio rodyklių nusistovėjimo paklaidoms sumažinti jame gali būti naudojami reguliuojami spyruokliniai balansavimo elementai (1.1.23 pav.).

Toks precizinis rodyklių balansavimo elementas, kaip žiedinė spyruoklė – vadinamasis „plaukas“, gaminamas iš fosforo ir bronzos arba berilio ir vario junginių, sudaro galimybes labai tiksliai, laipsniškai išlyginti reversinius rodyklių mechanizmo laisvumus ir kiek įmanoma sumažinti rodyklių nusistovėjimo paklaidas.



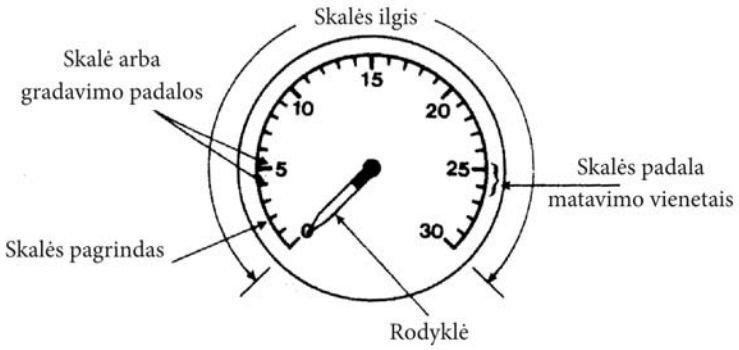
1.1.22 pav. Multirodyklinio rodmenų indikatoriaus mechanizmo elementas



1.1.23 pav. Žiedinės spyruoklės („laikrodinio plauko“) panaudojimas rodmenų indikatoriaus mechanizmui balansuoti: a – spyruoklės tvirtinimo metodas; b – nulio nustatymo būdas

Rodmenų atvaizdavimo elementai. Jie naudojami matavimo prietaisų informacijai atvaizduoti vartotojui patogia forma. Egzistuoja rodykliniai, skaitmeniniai, grafiniai, šviesinės signalizacijos ir mišrieji rodmenų atvaizdavimo elementai (indikatoriai). Rodykliniai indikatoriai gali būti su įprasta apskritąja arba tiesės pavidalo skalėmis.

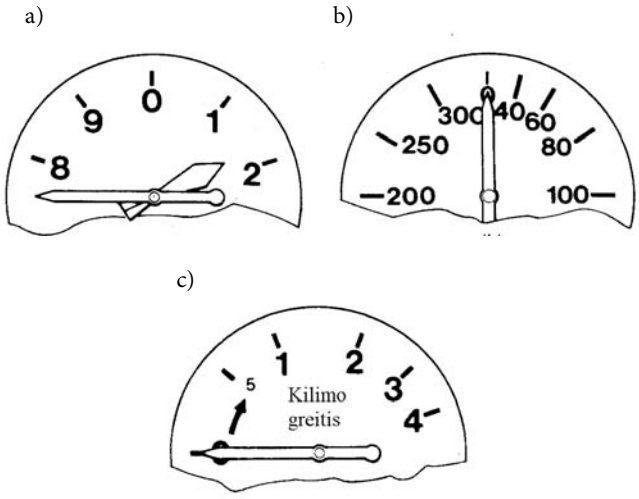
Apskritosios skalės. 1.1.24 pav. pateiktas rodyklinio indikatoriaus su apskritąja tolydine skale pavyzdys. Tokios skalės padalos yra vienodo intervalo, atitinkančio matuojamojo dydžio vienetą. Skalė gali būti sužymėta skirtingomis padalų žymėmis: trumpesnėmis arba ilgesnėmis. Pastarosios skirtos fizikinio dydžio vienetams kiekybiškai atvaizduoti. Tokios žymės pasikartojimo periodas pasirenkamas taip, kad būtų pasiektas patogus ir greitas duomenų nuskaitymas. Tačiau praktikoje ne visada pavyksta realizuoti duomenų atvaizdavimą tolydine vienodų intervalų skale. Pasitaiko matuojamųjų parametrų, kurių kitimo dėsnis nėra tiesinis. Tokiu atveju duomenų indikatoriuose naudojamos netiesinės nuskaitymo skalės, atitinkančios matuojamųjų dydžių kitimo funkciją.



1.1.24 pav. Rodyklinis indikatorius su apskritąja tolydine skale

Toliau (1.1.25 pav.) pateikti tokių indikatorių skalių pavyzdžiai. Laikrodžio pavidalo indikatoriaus su tiesine skale pavyzdys yra 1.1.25 pav., a. Šalia pateiktos netiesinės: kvadratiniu ir logaritminiu dėsniais kintančios indikatorių skalės. Jos atspindi indikatorinio ir vertikaliojo orlaivio greičių parametrų kitimo funkcijas (1.1.25 pav., b, c).

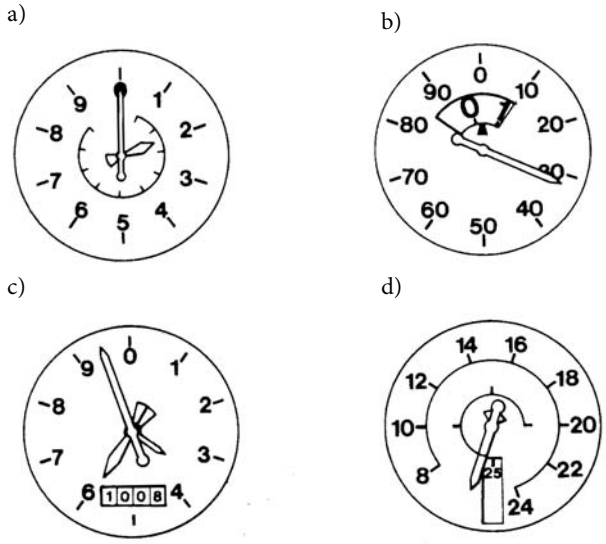
Paprastai numeracija skalėje auga nuosekliai. Tačiau, kai dėl matavimo dydžių kitimo funkcijos netiesiškumo tenka po truputį stambinti skalės matavimo intervalų reikšmes, duomenų nuskaitymo tikslumas gali sumažėti. Kai tai nepageidautina, taikomi vadinamieji ilgų skalių indikatoriai. Jie naudojami, pavyzdžiui, turbininių variklių sūkių skaičiaus, orinių greičių, skrydžio aukščio tiksliems matavimams. Keletas taikomų praktikoje indikatorių, realizuojančių „ilgosios skalės“ principą, parodyti 1.1.26 pav.



1.1.25 pav. Tiesinė ir netiesinė skalės: a – tiesinė laikrodžio pavidalo skalė; b – kvadratinės funkcijos skalė; c – logaritminė skalė

Paprasčiausiai realizuojamas indikatorius (1.1.26 pav., a) turi dvi, „sparčiąją" – išorinę ir „lėtąją" – vidinę, koncentrines skales su didžiąja ir mažąja rodyklėmis. Mažosios rodyklės žingsnis lygus dviem didžiosios rodyklės sūkiams. Rezultatams nuskaityti turi būti stebimos abi indikatoriaus rodyklės ir abi skalės. Šis indikatorius gali būti taikomas turbininio variklio rotoriaus sūkių dažnio matavimams atvaizduoti. Tokiu atveju ilgoji rodyklė, besisukanti prie išorinės skalės, rodys reikšmes šimtais apsūkų per minutę, o mažoji rodyklė, besisukanti prieš vidinę skalę, rodys tūkstančiais apsūkų per minutę reikšmes.

1.1.26 pav., b pateikto orinio greičio indikatoriaus duomenų vaizdavimo būdas pagrįstas koncepcija, panašia į anksčiau aprašytąją. Tačiau šiuo atveju mažoji rodyklė eliminuota, o vietoj jos nuo „sparčiosios" rodyklės prievado sukama vidinė grubiojo matavimo skalė, kurios rodmenis galima stebėti per padarytą langelį išorinėje tikslaus matavimo skalėje. Tikslioji skalė fiksuoja greičio reikšmes nuo nulio iki šimto mylių per valandą, o grubioji – šimtais mylių per valandą.



1.1.26 pav. Didelio diapazono ilgų skalių pavidalai: a – koncentrinė skalė; b – fiksuotoji ir sukamoji skalės; c – bendroji skalė su triguba rodykle; d – su plyšio pavidalo rodykle

1.1.26 pav., c rodomas indikacijos būdas, kai ant vienos ašies esančios skirtingo ilgio rodyklės naudojamos matuojamo parametro rezultatams atvaizduoti trimis skirtingais masteliais vienoje apskritoje dešimties padalų skalėje. Šis indikacijos variantas dažniausiai naudojamas aukščiamačiuose, kai didžiąja rodykle atskaitomi šimtai, vidutine rodykle – tūkstančiai, o mažąja rodykle – dešimtys tūkstančių pėdų

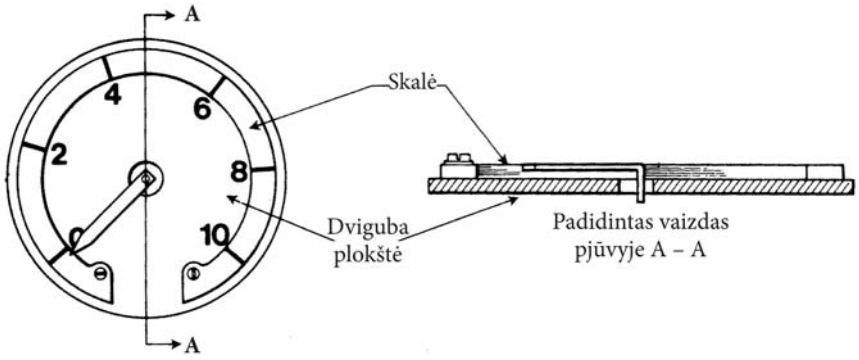
aukščiai. Šis metodas šiek tiek apsunkina nuskaitomų duomenų interpretaciją ir todėl gali mažėti laukiamųjų rezultatų patikimumas.

1.1.26 pav., d parodytas palyginti naujas rodmenų pateikimo metodas, naudojamas orinio greičio matavimams atvaizduoti. Čia duomenims nuskaityti panaudotos išorinė ir vidinė skalės, o rodmenimis operuoja viena rodyklė, fiksuojanti rodmenis išorinėje skalėje pirmojo pilno apsisukimo metu. Jam pasibaigus, toliau judančios rodyklės galu palengva atidengiama iki šiol uždengta mažoji skalė, esanti anapus didžiosios skalės. Mažosios skalės padėtį nustato specialus skalės fiksavimo mechanizmas. Trumpasis rodyklės galas, tęsdamas judėjimą, žymi rodmenis pagal vidinę skalę.

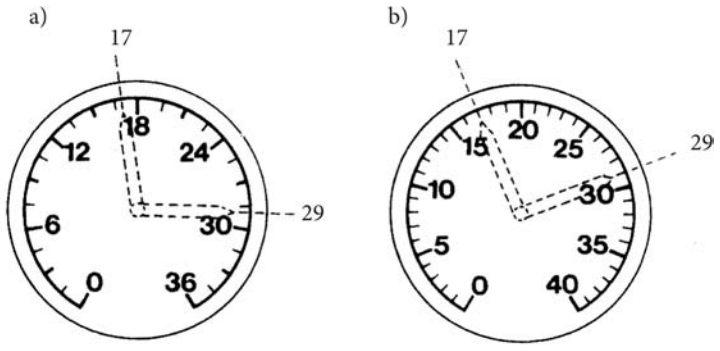
Kitas, rodykliniams indikatoriams su apskritąja skale svarbus duomenų nuskaitymo tikslumą lemiantis veiksnys, susietas su skalės ilgiu, prietaiso gabaritais ir rodyklės padėtimi, yra duomenų nuskaitymo stebėjimo kampas. Neteisingai parinkus šį kampą, sumažėja ilgosios skalės apžvalgos galimybės, atsiranda duomenų nuskaitymo paralakso paklaidų. Standartai reikalauja, kad indikatoriaus ciferblato stebėjimo sektoriaus kampas viršytų 30°. Ši problema efektyviai spendžiama naudojant indikatoriuose platformos pavidalo skalę 1.1.27 pav.

Šioje indikatoriaus konstrukcijoje apskritoji skalė su žymėmis iškelta aukščiau pagrindo plokštės taip, kad duomenų nuskaitymo skalės ir prietaiso rodyklės galiuko lygiai sutaptų.

Dar vienas klausimas, gana dažnai iškylantis nustatant indikacijos skalės ilgį, – tai darbinio skalės sektoriaus, kuriame dažniausiai stebimi matavimų rodmenys ir pilno skalės diapazono kampinis santykis. Labai dažnai skalės ilgiu manipuliuojama, norint pasiekti optimalų būtiną skalės darbinį kampą, paliekant nenaudojamos skalės dalį. Iš pirmo žvilgsnio tai neracionalu, tačiau padeda didinti duomenų nuskaitymo patikimumą 1.1.28 pav.



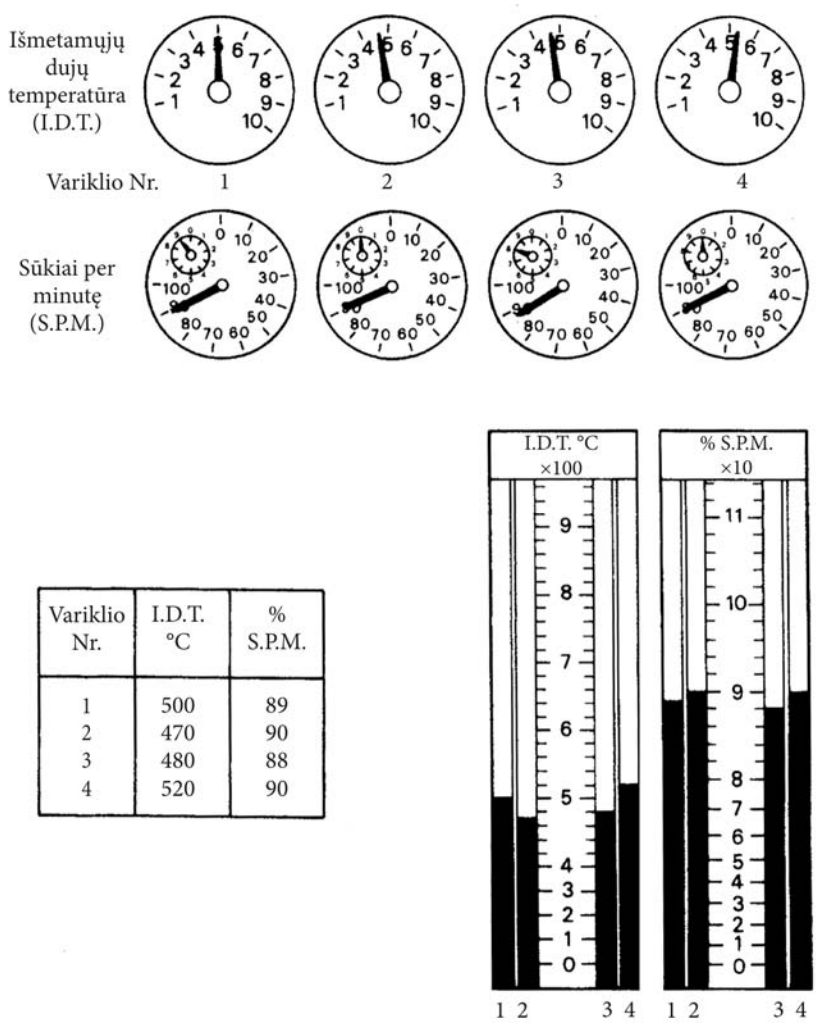
1.1.27 pav. Platformos pavidalo skalė



1.1.28 pav. Nuskaitymo tikslumas: a – tolygus skalės ilgis ir darbinis sektorius;
b – skalės diapazonas, viršijantis darbinį sektoriaus kampą

Tiesiosios skalės. Tiesiųjų skalių indikatorių panaudojimas tampa pakankamai efektyvus, kai analogiškų matavimų rezultatus, gaunamus iš keleto vienodų objektų, tenka stebėti vienu metu. Pavyzdžiui, matuojant orlaivio variklių išmetamųjų dujų temperatūrą (arba) bei jų turbinų sūkių dažnį ir pan.

1.1.29 pav. pateiktas tokių matavimų rezultatų atvaizdavimas indikatoriuose su apskritąja ir tiesės pavidalo skalėmis.



Variklio Nr.	I.D.T. °C	% S.P.M.
1	500	89
2	470	90
3	480	88
4	520	90

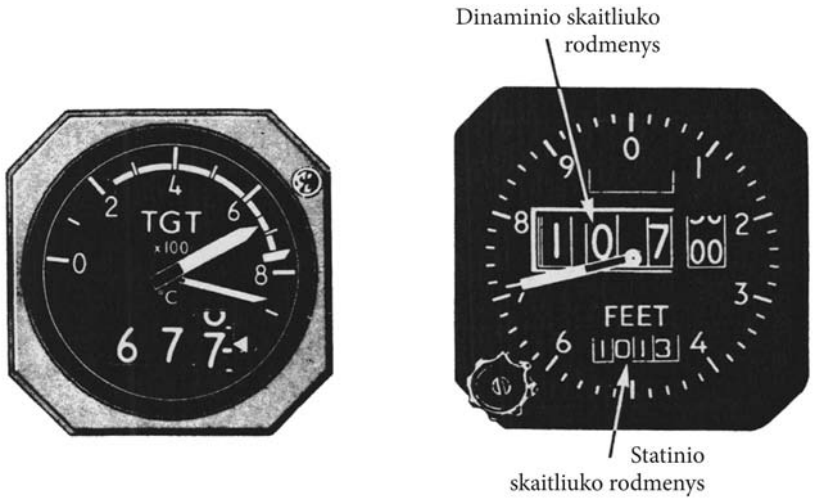
1.1.29 pav. Judančiosios juostos ir apskritosios skalės indikatorių palyginimas

Kaip matyti iš pateikto palyginimo, judančiosios juostos indikatorius šiuo atveju daug informatyvesnis, nes palengvina palyginamąjį variklių parametrų stebėjimą.

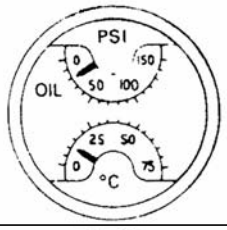
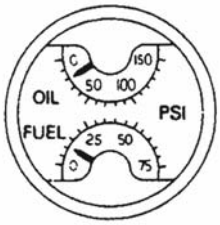
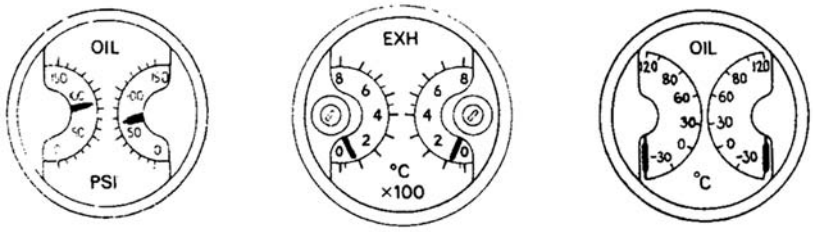
Skaitmeninė indikacija. Jos taikymo pavyzdžiai, pateikti 1.1.30 pav., akivaizdžiai parodo šio vaizdavimo būdo ir jo derinimo su kitais vaizdavimo būdais privalumą, šiuo atveju matuojant einamąjį ir santykinį orlaivio aukščius.

Dvejopos informacijos indikatoriai. Taikomi tada, kai norima taupyti prietaisų skydelio erdvę, ypač matuojant skirtingus kiekybinius, su jėgaine susietus parametrus. Tai atliekama dviem pagrindinėmis formomis: kada du skirtingi indikatoriai bei skalės jungami viename korpuse ir kai turimi du indikatoriai viename korpuse, bet su rodyklėmis prieš bendrąją skalę. Tipiniai atvaizdavimo derinių pavyzdžiai parodyti 1.1.31 pav.

Spalvotieji indikatoriai. Spalvinių zonų naudojimas indikatoriuose gali žymiai praplėsti jais tiekamos informacijos diapazoną, turint omenyje žmogaus specifinę reakciją į spalvinę vaizdavimo formą. Kada indikatorių skalės atskiri sektoriai nudažomi skirtingomis spalvomis, reiškiančiomis duomenų kitimo diapazono ypatingą fukciją, žymiai padidėja matavimų rezultatų stebėjimo kokybė bei vertinimo operatyvumas.



1.1.30 pav. Skaitmeninių indikatorių taikymas

Matavimai	Pateikimas
A. Dviejų skirtingų vienos sistemos dydžių	
B. Vieno dviejų skirtingų sistemų dydžio	
C. Vieno dviejų vienodų sistemų dydžio	

1.1.31 pav. Dvejopos informacijos indikatorių pavyzdžiai

1.1.32 pav. pateiktame indikatoriaus pavyzdyje spalvomis pažymėti orinio greičio diapazonų sektoriai turi tokias reikšmes:

– RAUDONA radialinė linija – didžiausio ir mažiausio aukščio ribos;

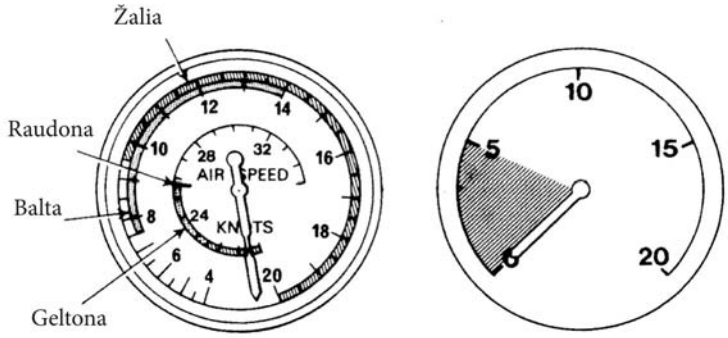
– GELTONAS sektorius – kilimo ir padidinto pavojingumo aukščių sektorius;

– ŽALIAS sektorius – normalus darbinis skrydžių aukščių sektorius;

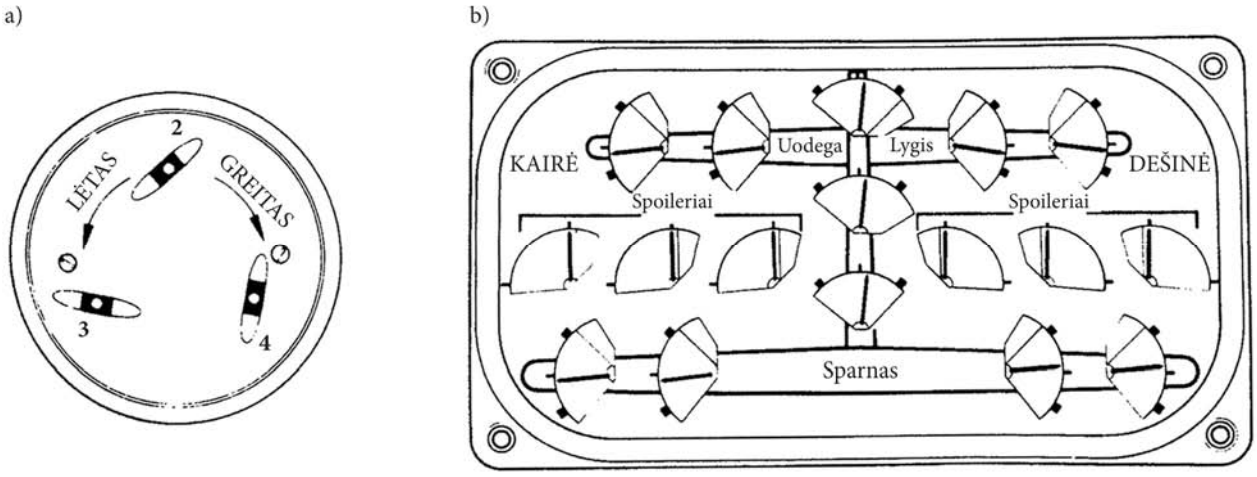
– RAUDONAS sektorius – aukščių sritis, kurioje skrydis draudžiamas.

Kokybinai indikatoriai. Tai indikatoriai, kuriuose informacija pateikiama specialaus pavidalo simboliais ar kita vaizdine forma, nurodančia sistemos būseną. Du tokie indikatoriai parodyti 1.1.33 pav.

Sinchroskopas 1.1.33 pav., a skirtas orlaivyje esančių kelių sraigtinių variklių sukimosi geičių (sūkiais per minutę) tarpusavio sinchonizacijai atvaizduoti. Indikatoriaus rodyklės simbolizuoja atskirų variklių sraigtus (propelerius), kurie sukasi skirtingais greičiais.



1.1.32 pav. Spalvų panaudojimas atvaizdavimo elementuose: baltas lankas 75–140; žalias lankas 95–225; geltonas lankas 225–255; raudonas lankas ir brūkšnys 255



1.1.33 pav. Kokybiniai indikatoriai: a – variklių sinchronizavimas; b – skrydžio valdymo paviršių padėtis

1.1.33 pav., b pateiktas pavyzdys, kaip galima atvaizduoti orlaivio padėtį keičiančius mazgus, šiuo atveju – skrydžio valdymo paviršius, tūpdymo skydelius ir oro spoilerius. Šiuos mazgus valdo septyniolika atskirų elektrinių mechanizmų, kuriais jie pozicionuojami, o jų padėtis rodoma bendrajame vaizduoklyje, valdymo mechanizmų padėtį simbolizuojančiais indikatoriais.

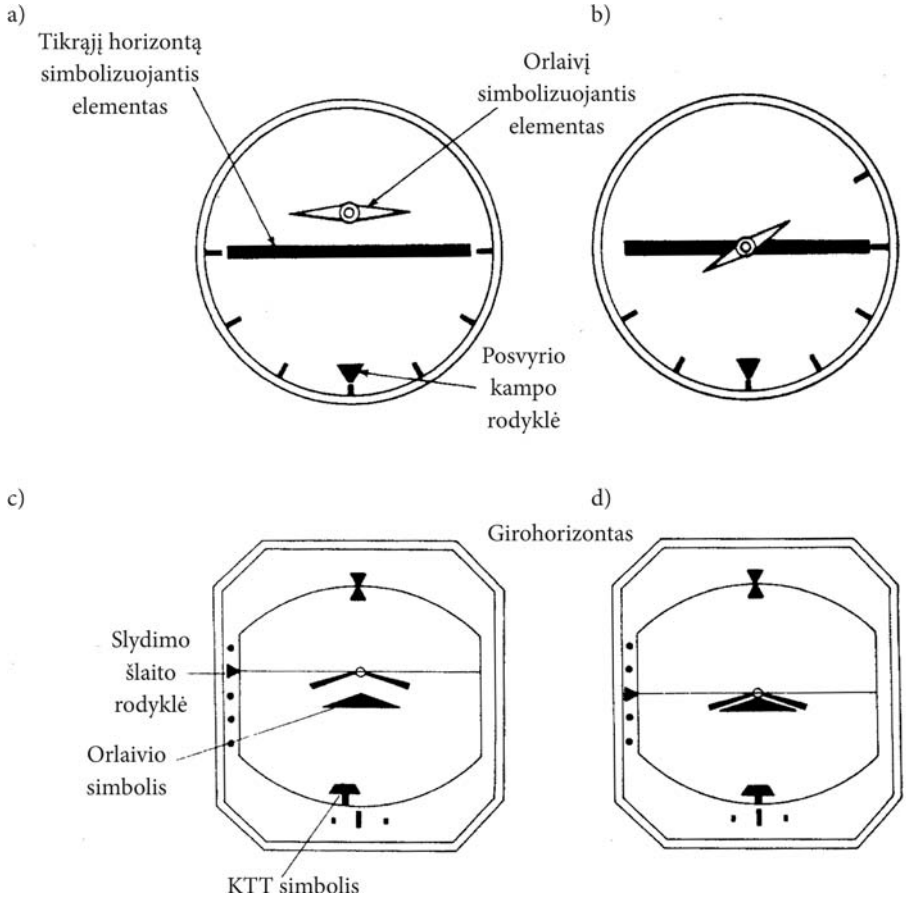
Valdymo semantiniai vaizduokliai skirti pateikti pilotui vizualią informaciją apie orlaivio polinkio ir posvyrio kampus bei kryptį lengvai suprantama vizualia forma, taikant „natūralius“, vaizdžius simbolius. Taigi vaizduoklio ekrane skrydžio situacija turi būti pateikiama taip, kad pilotas vienareikšmiškai suprastų, kokius orlaivio valdymo veiksmus jis turi šiuo metu atlikti. Be to, pilotui turi būti sudaryta galimybė realiu laiku stebėti vaizduoklio ekrane šių veiksmų vykdymo eigą. Kitaip tariant, skrydžio valdymo semantiniai vaizduokliai turi sudaryti natūralias skrydžio valdymo realiu laiku galimybes pagal jų ekraną.

Valdymo vaizduoklio procedūroms paaiškinti 1.1.34 pav. pateikama keletas praktinių pavydžių.

Viršutinėje paveikslo dalyje (a) ir (b) vaizduojamas orlaivio polinkio ir posvyrio valdymas, matuojamas padėties rodikliu AI (*Attitude indicator*); apatinėje paveikslo dalyje (c) ir (d) vaizduojamas orlaivio tūpdymas pagal ILS (*Istrument Landing System*).

Orlaivio padėties valdymo vaizduokliuose yra olaivio simbolis, horizonto linija, polinkio kampo skalė ir kiti valdymui reikalingi rodikliai bei simboliai. Šių vaizduoklių susiejimo su orlaivio valdymo įrenginiais principai bus aiškinami vėliau, nagrinėjant giroskopinius orlaivio valdymo prietaisus.

Prietaisų grupavimas atliekamas taip, kad olaivio pilotams ir kitiems ekipažo nariams būtų patogu jais naudotis. Prietaisai grupuojami pagal paskirtį ir svarbą valdant orlaivį į dvi grupes: skrydžio prietaisų grupę ir variklio prietaisų grupę.



1.1.34 pav. Orlaivio valdymo atvaizdavimo pavyzdžiai: a – nuoroda „skristi žemyn“; b – nuoroda „sukti į dešinę“; c – nuorodos „skristi į kairę“ ir „skristi aukštyn“; d – nuoroda išjungti variklį“

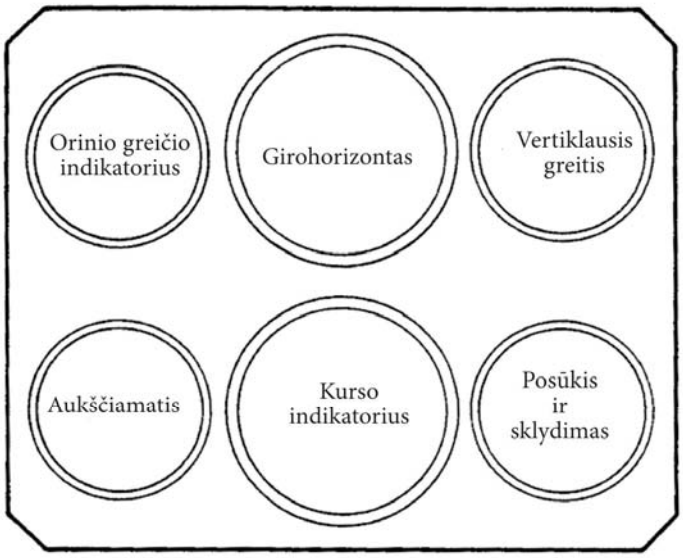
Pilotų kabinoje pirmiausia išdėstomi pagrindiniai skrydžio prietaisai: orinio greičio indikatorius, aukščiamatis, giroskopinis aviahorizontas, kurso indikatorius, vertikaliojo greičio indikatorius, posūkio ir posvyrio indikatorius, kurie sudaro bazinę prietaisų grupę taip, kad jų eksploatavimo koordinacija nebūtų sudėtinga ir juos stebint kiltų kuo mažesnė klaidų galimybė.

Tipinis šių prietasų išdėstymas orlaivių kabinose vadinamas „Šešių baze“ (1.1.35 pav., a). Šioje prietaisų išdėstymo bazėje aviahorizontas yra centre todėl, kad jo ekrane vaizduojama olaivio padėtis ir padėties pokyčiai, polinkai bei posvyriai ir jis naudojamas kaip pagrindinis piloto prietaisas. Nors orinio greičio ir skrydžio aukščio valdymas yra tiesiogiai susiję su orlaivio padėtimi, orino greičio indikatorius, aukščiamatis bei vertikaliojo greičio indikatorius išdėstyti šalia aviahorizonto ir padeda vertinti aukščio padėtį. Pagal kurso indikatorių stebima informacija apie orlaivio krypties pokyčius padeda laiku išvengti pavojingų nuokrypių ir laikytis numatyto skrydžio kurso. Šis prietaisas, kaip pagalbinis, vertinant orlaivio skrydžio kryptį, dedamas žemiau aviahorizonto. Posūkio ir slydimo indikatorius, teikiantis antrinius orlaivio krypties pokyčius, irgi tik padeda kampinių pokyčių interpretacijai ir yra šalia kurso indikatoriaus.

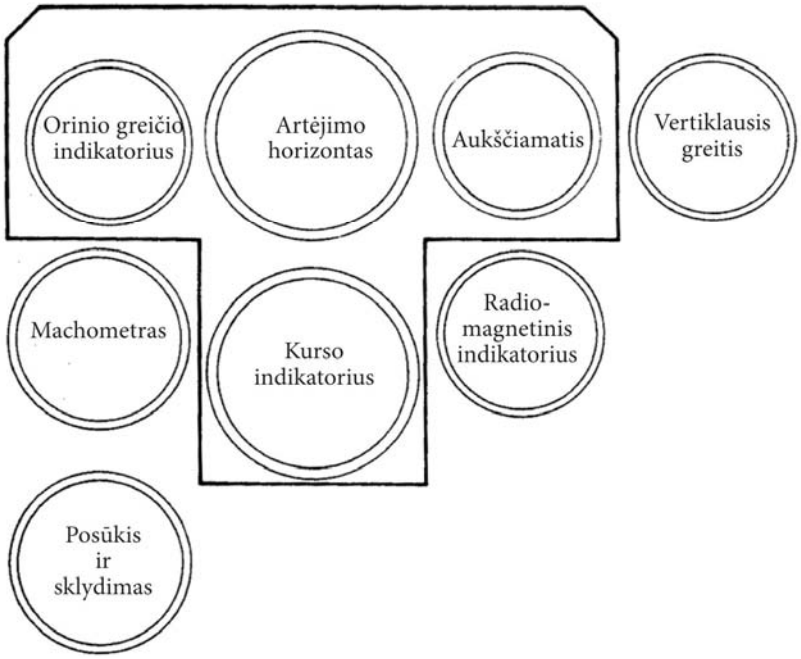
Tobulėjant aviacijai, naujųjų orlaivių tipuose pradėta naudoti kita bazinė skrydžio prietaisų išdėstymo tvarka – vadinamoji „bazė T“ (1.1.35 pav., b). Šio skrydžio prietaisų išdėstymo būdas grindžiamas tuo, kad pagrindinę skrydžio informaciją tiekiantys prietaisai turi būti išdėstyti greta vienas kito, sudarydami pagrindinę bazę. Kiti pagalbinę informaciją tiekiantys prietaisai turi būti išdėstomi šalia pagrindinės bazės pagal jų fukcinę paskirtį.

Taigi, „bazės T“ horizontalioji dalis yra sudaryta iš keturių „kertinių“ skrydžio prietaisų: orinio greičio indikatoriaus, polinkio ir posvyrio padėties indikatoriaus ir aukščiamačio, o vertikalioje dalyje yra kurso indikatorius. „Bazės T“ išorėje, prie kurso indikatoriaus, yra radiokompaso indikatorius, o kitoje pusėje, žemiau orinio greičio indikatoriaus, machometras. Vertikaliojo greičio indikatorius yra šalia aukščiamačio, o prie kurso indikatoriaus, žemiau machometro, – posūkio bei posvyrio ir slydimo indikatoriai.

a)

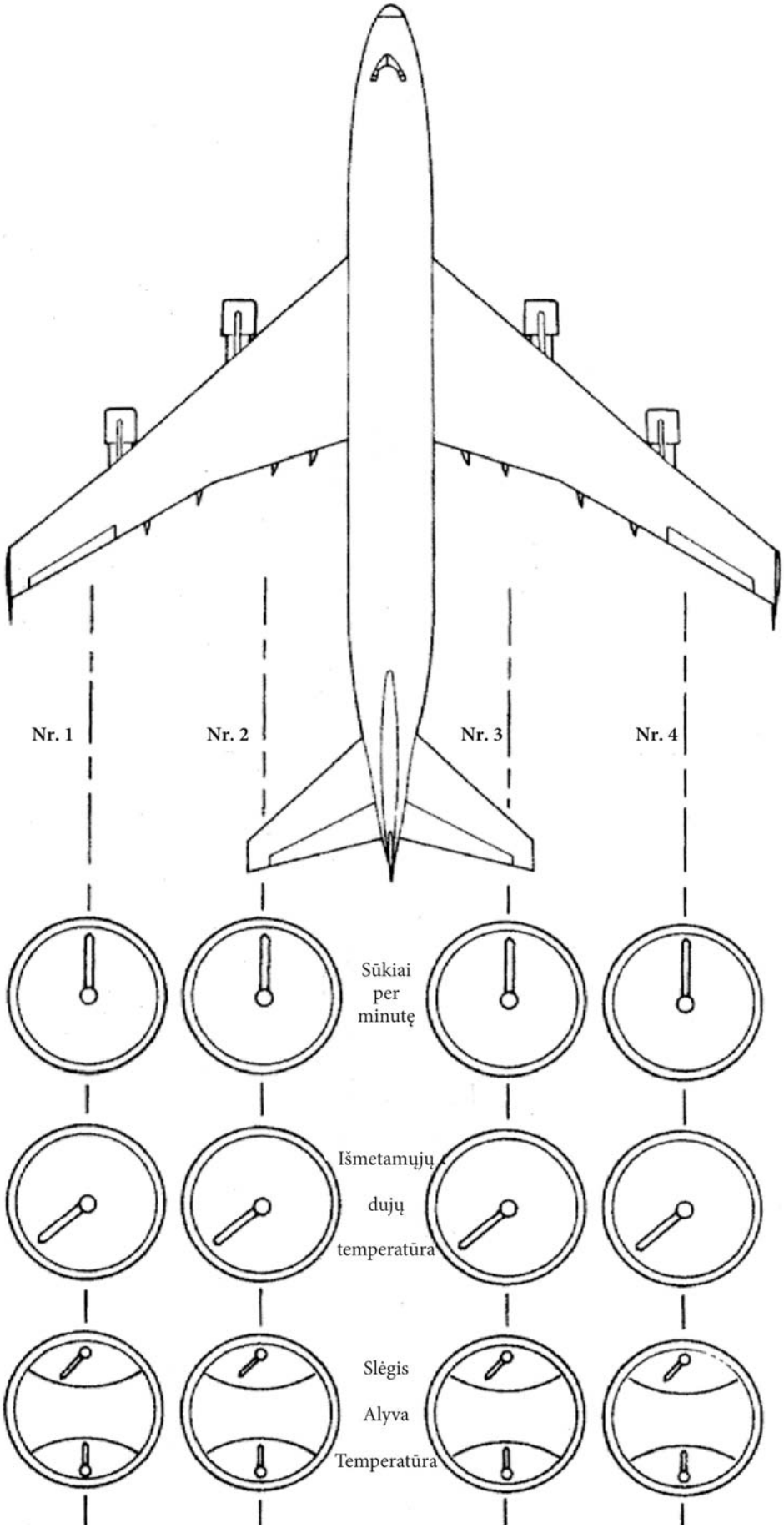


b)



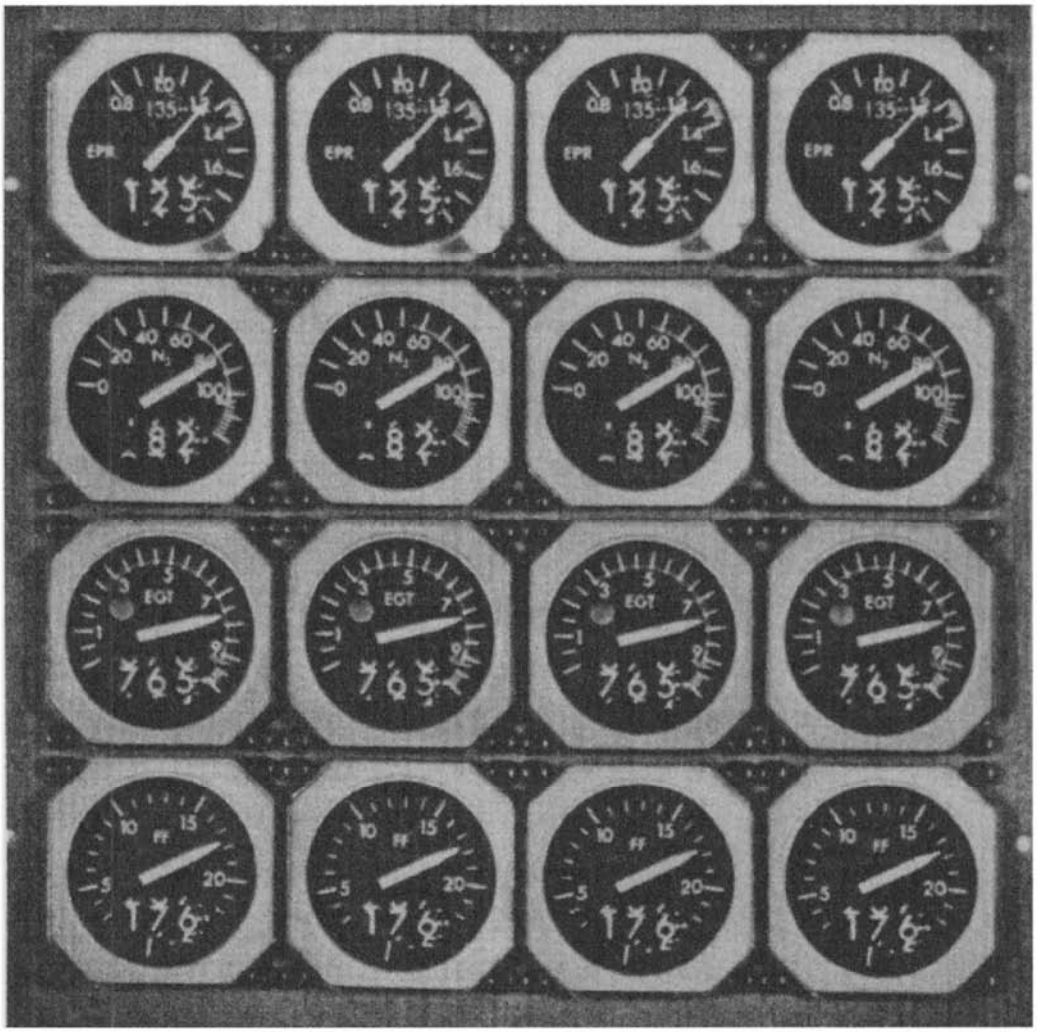
1.1.35 pav. Skrydžio prietaisų grupavimas: a – „bazė šešių“; b – „bazė T“

Jėgainės prietaisai grupuojami pagal orlaivio variklių išdėstymą 1.1.36 pav. Pilotų kabinoje išdėstomi jėgainės prietaisai, kurie padeda stebėti ir valdyti variklių režimus kilimo, skrydžio pagal nustatytą kreiserinį greitį metu ir tūpimo nusileidimo vietoje.



1.1.36 pav. Jėgainės prietaisų grupavimas

1.1.37 pav. parodytas pavyzdys, kaip ir kokie jėgainės prietaisai išdėstyti orlaivio *Boing* 747 pilotų kabinoje pirmojo piloto darbo vietoje.



1.1.37 pav. Lėktuvo *Boing* 747 jėgainės įrangos prietaisų grupavimas

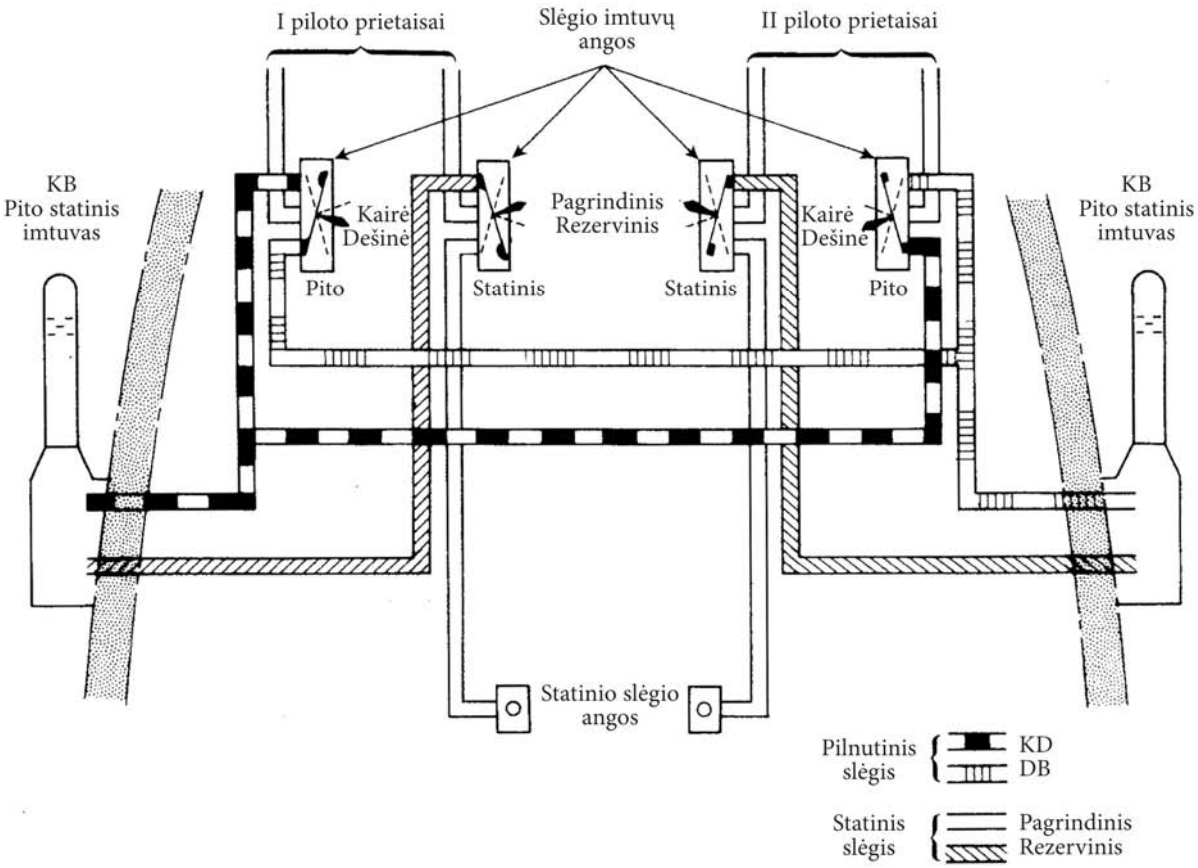
Kiekvienoje vertikalioje prietaisų eilėje išdėstyti skirtingų variklių prietaisai. Visa prietaisų grupė dubliuojama antrojo piloto darbo vietoje.

1.1.3. Pito-statinė sistema

Orlaivio ***Pito-statinio*** slėgio sistemos paskirtis – nuolat tiekti aerometriniams prietaisams skrydžio metu orlaivį veikiantį pilną oro pasipriešinimo slėgį ir statinį, orlavį supančios netrikdytos atmosferos slėgį skrydžio aukštyje. Tai atliekama tam, kad, orlaiviui skrendant, galima būtų nepertaukiamai matuoti skrydžio greičio pokyčius bei aukščio kitimą, o kartu ir aukščio kitimo greitį (vertikalųjį orlavio greitį).

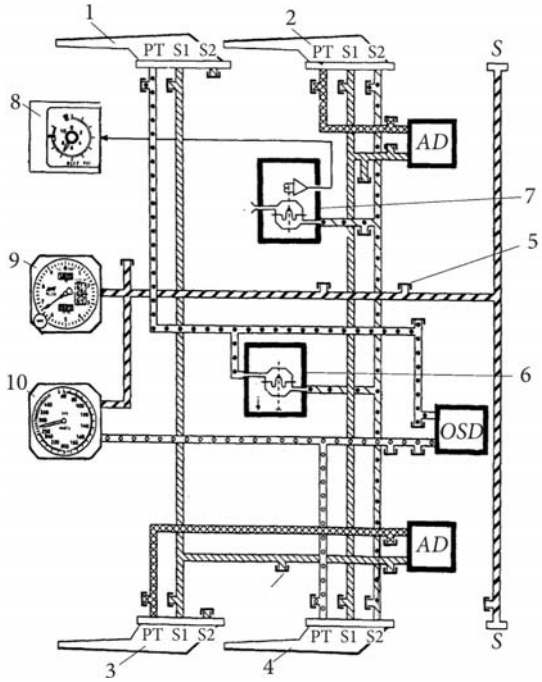
Pilna tipinė skrydžio pilotavimo prietaisų ir slėgio tiekimo sistemos sujungimo schema pateikta 1.1.38 pav.

Tiekimo sistema sudaryta iš dviejų pilnutinio slėgio magistralių, keturių pagrindinio statinio slėgio magistralių ir vienos rezervinės magistralės. Pilnutinis slėgis perduodamas iš dviejų pilnutinio slėgio imtuvų, išdėstytų ant orlaivio korpuso iš kairės ir dešinės. Vienas imtuvas aprūpina orlaivio įgulos vado (pirmojo piloto) prietaisus ir yra rezervinis antrojo piloto prietaisų atžvilgiu. Antrasis imtuvas – atvirkščiai. Simetrinis statinio slėgio imtuvų išdėstymas ant korpuso iš dešinės ir kairės bei jų porinės jungtys į vieną liniją palaiko slėgio pastovumą, esant orlaivio skrydžio krypties pokyčiams. Pagrindinio slėgio tiekimą į rezervinį perjungia pultuose išdėstyti čiaupai.



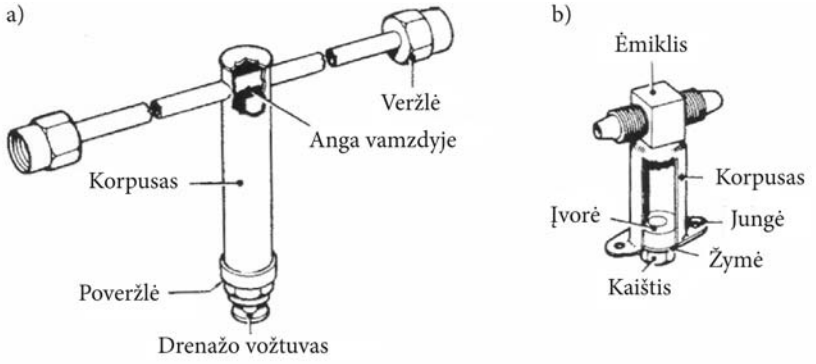
1.1.38 pav. Tipinė Pito-statinio slėgio tiekimo į pilotavimo prietaisus schema

Prie Pito-statinės sistemos magistralių jungiami aerometriniai matavimo prietaisai (1.1.39 pav.), kurie matavimų sistemos patikimumui padidinti dubliuojami ir sudaro minėtąsias pirmojo ir antrojo pilotų prietaisų grupes. Sistemoje numatyti drėgmės kondensato drenavimo ir surinkimo elementai bei orinio slėgio imtuvų ir slėgio tiekimo magistralių šildymo nuo apledėjimo įtaisai.



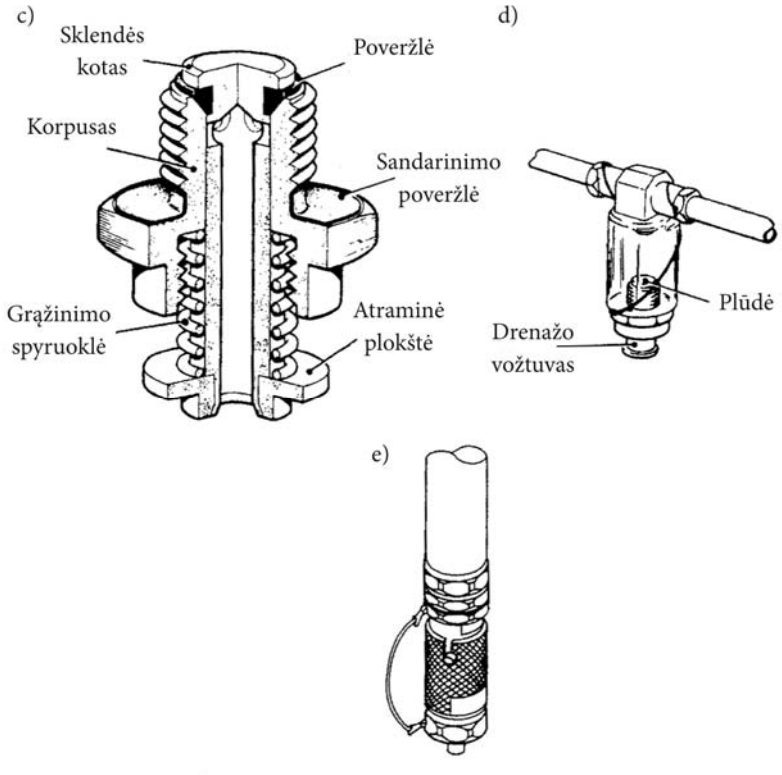
1.1.39 pav. Aerometrinių prietaisų jungimo į Pito-statinę sistemą pavyzdys: PT – pilnutinio slėgio magistralės; S – statinio slėgio magistralės; AD – aukščio davikliai; OSD – orinio slėgio daviklis; 1–4 – pilnutinio ir statinio slėgio imtuvai; 5 – drenažiniai surinktuvai; 6 – orinio slėgio reguliatorius; 7 – kabinos slėgio daviklis; 8 – kabinos slėgio rodytuvas; 9 – aukščiamatis; 10 – tikrojo orinio greičio rodytuvas

Vandens kondensato Pito-statinėje sistemoje drenavimo metodus rodo toliau pateikti gaminių pavyzdžiai (1.1.40; 1.1.41 pav.). Kelių tipų kondensato vandens kaupimo ir drenavimo elementai (drenažiniai surinktuvai), kurie montuojami slėgio magistralių vamzdyne sistemos funkcionavimo kondicijai palaikyti (1.1.40 pav.). Šie elementai ir jų sudedamosios dalys, kaip ir patys vamzdynai, gaminami iš atsparių korozijai ir vibracijoms lengvų metalų lydinių ar kompozitinių medžiagų.



1.1.40 pav. Vandens kaupikliai su drenavimo vožtuvu (a) ir kaiščiu (b)

Pito-statinės sistemos slėgio magistralių vamzdyno drenavimo metodai ir priemonės priklauso nuo orlaivio tipo ir būna pakankamai įvairios. Taip yra todėl, kad vieni, dažniausiai stambūs, serijinių orlaivių gamintojai gali projektuoti ir gaminti savas drenavimo kaupiklių ir vožtuvų konstrukcijas, o smulkesni gamintojai naudojasi specializuotų gamintojų unifikuota produkcija.

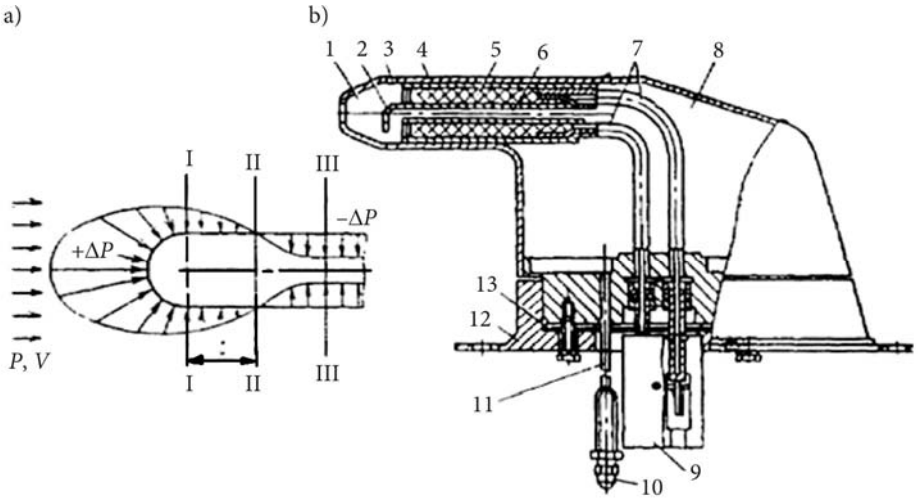


1.1.41 pav. Drenavimo vožtuvo konstrukcija: c – drenavimo vožtuvo konstrukcija; d – permatomas vandens kaupiklis su drenažo vožtuvu; e – mišrusis surinkimo rezervuaras su drenažo vožtuvu

Orinio slėgio imtuvai. Statinis ir pasipriešinančio oro pilnutinis slėgiai į oro duomenų tiekimo sistemą patenka per ***orinio slėgio imtuvus*** (Pito vamzdelius), kurių sudarymas pateiktas 1.1.42 pav. ***Statinis slėgis*** *P* apibūdinamas kaip slėgis, tenkantis statinėje oro aplinkoje esančio kūno paviršiaus vienetui. 1.1.42 pav., a parodyta perteklinių slėgių pasiskirstymo ant cilindrinio kūno paviršiaus epiūra, esant

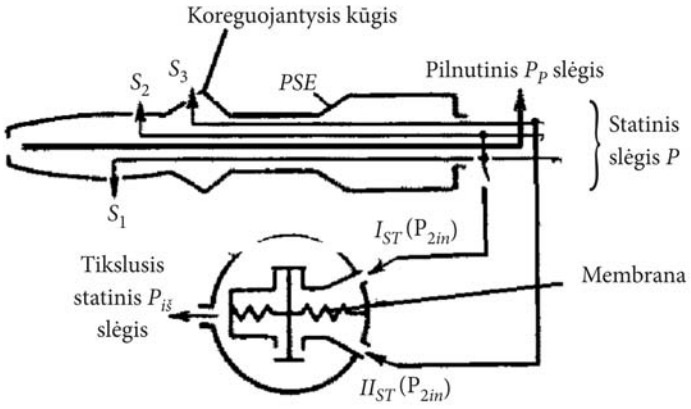
pastoviam oro srauto greičiui *V*. Pjūvio I-I plokštumoje slėgis kūno paviršiuje didesnis už absoliutųjį slėgį *P*, o pjūvyje III-III – mažesnis. Pjūvyje II-II, nuo pjūvio I-I nuotolusiame atstumu *l*, kūno paviršiuje slėgis lygus statiniam slėgiui *P*. Aplink kūno perimetrą pjūvyje II-II padarius simetriškas kiaurymes, kūno viduje slėgis taptų lygus *P*. Statinio slėgio imtuvai, pagrįsti šiuo efektu, paprastai gaminami arba kaip specialūs antgaliai su kiaurymėmis jų paviršiaus vietose, arba kaip specialios plokštės su kiaurymėmis, įtaisytomis orlaivio sklandmens paviršiuje.

Pilnutinis slėgis P_p – tai slėgis, tenkantis kūno paviršiaus vienetui, kurio plokštuma statmena plūstančio oro srauto greičio vektoriui $\vec{V}$. Slėgis P_p lygus statinio *P* ir dinaminio P_{din} slėgių sumai. 1.1.42 pav., a slėgis P_p yra tik cilindrinio kūno paviršiaus taške *A*. Šiame taške *A* padarius kiaurymę, vidinėje cilindrinio kūno dalyje (plokštumoje II-II), jei daugiau angų nėra, nusistovės pilnutinis slėgis P_p. 1.1.42 pav., b pateiktas ***pilnutinio slėgio imtuvo*** variantas. Oro srautas, kurio greitis *V*, stabdomas prie kameros *1* įėjimo. Tada slėgis kameroje *1*, lygus P_p, pro vamzdelį *6*, kamerą *8*, pneumolaidį *11* perduodamas į atvamzdį *10*, prijungtą prie pilnutinio slėgio magistralės. Drenažo angos *3* su stogeliu *2* korpuse *4* yra skirtos drėgmei iš kameros *1* pašalinti. Imtuvą šildo nikelinio laido spiralė *5*, maitinama įtampos, perduodamos per jungtį *9* laidais *7*. Imtuvas tvirtinamas prie jungės *12*. Kameros hermetiškumą palaiko tarpinė *13*.



1.1.42 pav. Orinių slėgių imtuvai: a – perteklinių slėgių pasiskirstymo cilindrinio kūno paviršiuje epiūra; b – pilnutinio slėgio imtuvas

1.1.43 pav. parodytas oro slėgio imtuvas, vienu metu tiekiantis pilnutinį P_p ir statinį *P* slėgį. Pilnutinis slėgis P_p perduodamas kiauryme *P* (П) ir nukreipiamas per vieną iš keturių atvamzdžių.

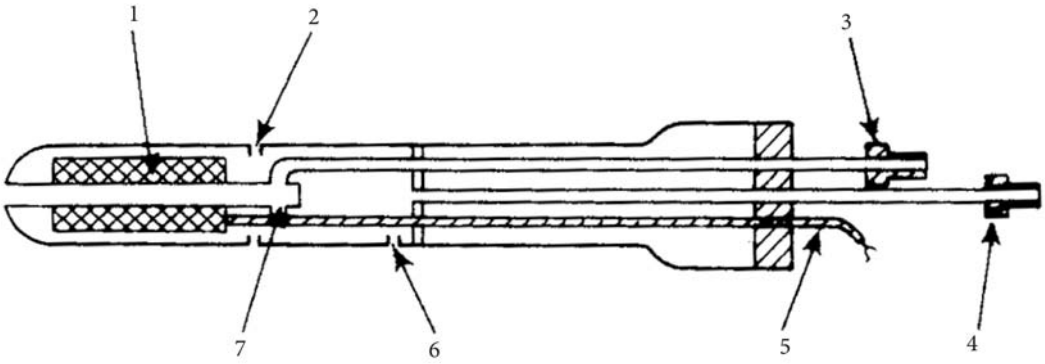


1.1.43 pav. Oro slėgių imtuvo su koreguojančiuoju kūgiu schema

Kiaurymės *S1, S2, S3,* perduodančios slėgį, susisiekia su trimis hermetinėmis kameromis, išvestomis į atskirus atvamzdžius. Imtuvas turi ***koreguojantįjį*** kūgį su „ikigarsine“ statinio slėgio kamera, susisiekiančia su kiauryme *S3*. Skrydžio metu, kai greitis $M < 1$, slėgis šioje kameroje artimas statiniam, o slėgiai kamerose su kiaurymėmis *S1* ir *S2* skiriasi nuo jo. Skrendant greičiu $M > 1$, atvirkščiai – kamerose su kiaurymėmis *S1* ir *S2* slėgiai artimi statiniam, o kameroje su kiauryme *S3* slėgis skiriasi nuo jų. Skrendant greičiu $M < 1$, prie orlaivio statinio slėgio magistralės prijungiama kamera su kiauryme *S3*, o greičiu $M > 1$ – kamera su kiaurymėmis *S2* ir *S1*. Kameros, atsižvelgiant į skrydžio greitį, perjungiamos pneumatiniu jungikliu *PP* pagal slėgių skirtumo ženklą kamerose su kiaurymėmis *S1* (*S2*) ir *S3*.

Orinio slėgio imtuvams, be abejo, būdingos paklaidos. Statinio slėgio perdavimo paklaidos yra aerodinaminės, t. y. priklausančios nuo: eksperimento paklaidų, nustatant imtuvų charakteristikas; matavimo prietaisų netikslumų; imtuvo gaminimo netikslumų; imtuvo vietos sąlygų įtakos. Tokioms paklaidoms eliminuoti kartais naudojami aerodinaminių pataisų skaičiuokliai. Skrydžio metu orinio slėgio imtuvai, veikiami žemos priimamo oro temperatūros ir ore esančios drėgmės, gali labai greitai apledėti. Tokiu atveju oro slėgio tiekimas į Pito-statinę sistemą bus sutrikdytas. Siekiant išvengti šios situacijos, orinio slėgio imtuvų konstrukcijose numatoma galimybė šildyti oro priėmimo angas. Paprastai toks šildymas pradedamas prieš skrydį, net esant teigiamai temperatūrai, ir palaikomas skrydžio metu iki pat jo pabaigos.

1.1.44 pav. pateiktoje orinio slėgio imtuvo konstukcijos schemoje: oro priėmimo angų elektrinis šildymo elementas *1,* sujungiamas su jo maitinimo šaltiniu – kabeliu *5*, gaubia pilnutinio orinio slėgio priėmimo tūtą. Šiluma perteikiama ir statinio atmosferos slėgio priėmimo kamerai ir angoms *2*. Orinio slėgio imtuve numatytas pilnutinio orinio slėgio tūtos drenažinis drėgmės surinktuvas *7* ir statinio slėgio priėmimo kameros drenažinė ertmė *6*. Prie pilnutinio ir statinio slėgių tiekimo magistralių imtuvas jungiamas *3* ir *4* jungtimis.

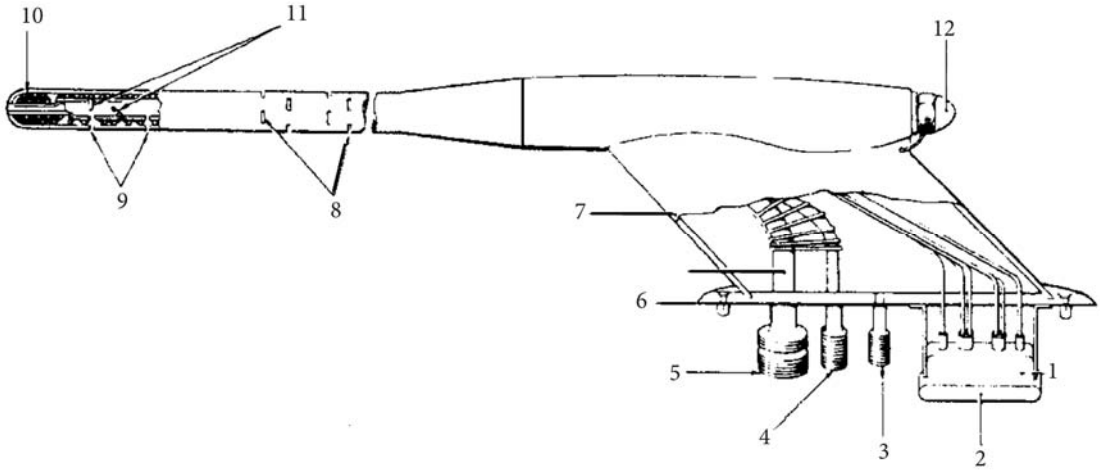


1.1.44 pav. Orinio slėgio imtuvo šildymo scema: 1 – šildymo elementas; 2 – šilumos tiekimo angos; 3, 4 – jungtys; 5 – kabelis; 6 – drenažinė ertmė; 7 – drėgmės srinktuvas

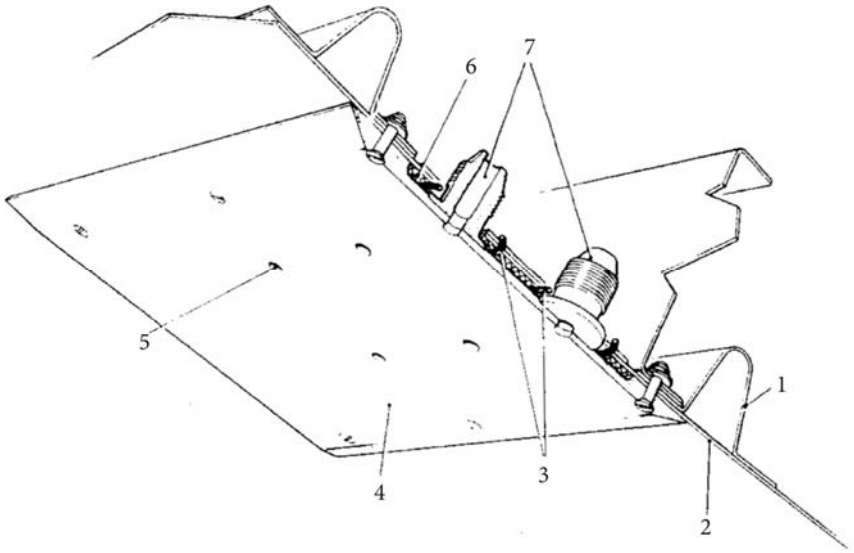
1.1.45 pav. parodytas Pito-statinio imtuvo tipas, kuris taikomas eksploatuojant šiuolaikinius reisinius oro lainerius. Tokio tipo imtuvai montuojami ant stiebo, kuris tvirtinamas prie orlaivio liemens apvalkalo taip, kad būtų tinkamai išlaikyta reikiama oro priėmimo kampinė padėtis, t. y. būtų lygiagreti su orlaivį aptekančiu oro srautu. Orlaivyje montuojami keli tokių imtuvų komplektai (1.1.38 pav.).

Pilnutinis slėgis perduodamas iš imtuvo per hermetišką kamerą, esančią imtuvo tvirtinimo stiebe, į tiekimo sistemos magistrales, prijungus jas jungtimis. Siekiant išvengti vandens ar kitų išorinių poveikių įtakos pilnutinio slėgio imtuve, numatyti specialūs oro srauto filtrai. Susikaupusiam vandens kondensatui pašalinti egzistuoja drenažinės angos ir stiebo drenažinis varžtas. Imtuvo priekinės dalies ir stiebo ertmių šildymas atliekamas dviem šildytuvais – priekiniu ir galiniu. Šildytuvų įjungimas bei šildymo intensyvumas valdomi iš pilotų kabinos prietaisų valdymo pulto, kuriame yra indikacija apie šildytuvų funkcionavimą.

Kartu su mišriaisiais Pito statinio orinio slėgio imtuvais orlaivių orinio slėgio tiekimo sistemose papildomai įrengiami tik statinio orinio slėgio imtuvai. Visuose orlaiviuose supančios orlaivį atmosferos statinis slėgis priimamas angų pavidalo statinio slėgio imtuvais 1.1.46 pav.



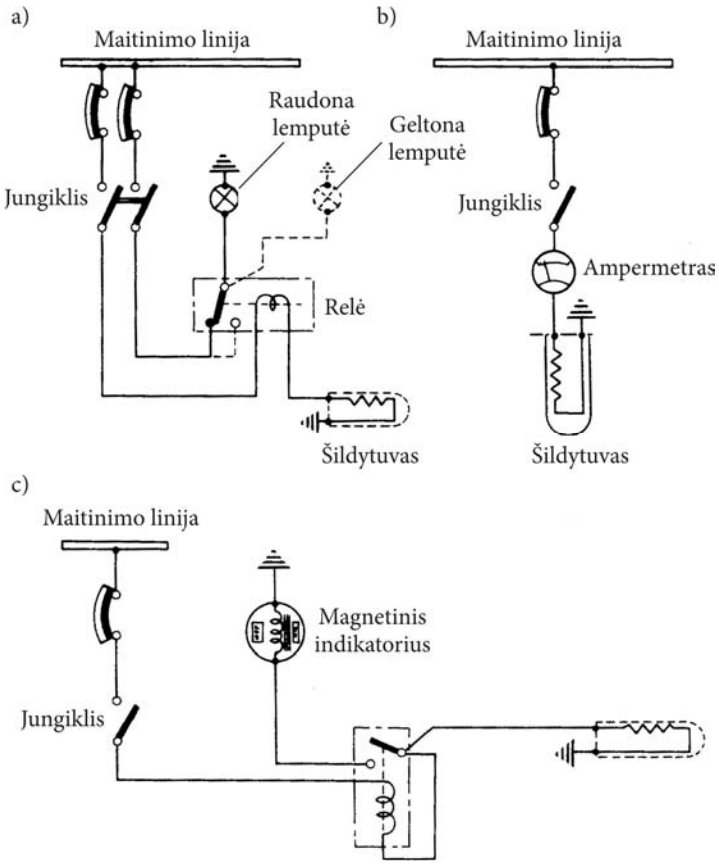
1.1.45 pav. Pito-statinio imtuvo konstrukcija: 1 – jungtis; 2 – dangtelis; 3 – pilnutinio slėgio jungtis; 4 – priekinės angos pastovioji jungtis; 5 – galinės angos pastovioji jungtis; 6 – galinis šildytuvas; 7 – stiebas; 8 – statinio slėgio angos; 9 – drenažo angos; 10 – priekinis šildytuvas; 11 – oro srauto filtrai; 12 – stiebo drenažinis varžtas



1.1.46 pav. Statinio orinio slėgio imtuvo konstrukcija: 1 – tarpas tarp briaunų; 2 – liemens apsiuva; 3 – sandarinimo apkaba; 4 – statinio orinio slėgio imtuvo plokštė; 5 – statinio slėgio priėmimo angos; 6 – temperatūros ir drėgnumo indeksas; 7 – jungės kyšulys

Statinio slėgio priėmimo angos daromos tose liemens dalyse, kur yra mažiausi oro sūkuriai. Todėl tokie imtuvai statomi toliau nuo orlaivio priekio, lygioje liemens dalyje, simetriškai abiejose orlaivio pusėse. Simetriškas statinio orinio slėgio imtuvų išdėstymas orlaivio liemens atžvilgiu leidžia sumažinti paklaidas orlaiviui darant posūkius, kada jam sukantis išorinėje pusėje slėgis šiek tiek didėja, o vidinėje – mažėja. Sujungus simetriškai išdėstytus statinio orinio slėgio imtuvus su viena statinio slėgio magistrale, slėgio vidurkis joje orlaivio posūkių metu išlieka pastovus ir lygus statiniam oriniam slėgui.

Tipinė šildytuvų valdymo schema parodyta 1.1.47 pav. Schemoje (a) pavaizduotas šildytuvo prijungimas prie elektros maitinimo linijos ir atitinkamų šildymo signalizavimo elementų įjungimas (b) ir (c).



1.1.47 pav. Orinio slėgio imtuvo šildytuvo valdymo schema: a – šildytuvo schema; kontrolės indikatorių prijungimo schemos; b – ampermetro; c – magnetinio indikatoriaus

Schemoje (a) pavaizduotas įjungimo valdymas, kai sujungus jungiklio kontaktus, nuo maitinimo linijos per šildytuvo spiralę pradeda tekėti elektros srovė. Antrasis maitinimo šaltinio polius ir šildytuvo kaitinimo spiralės kontaktas yra įžeminti. Nuo šio momento šildytuvas pradeda veikti. Šildymą signalizuoja geltona signalinė lemputė, kurią įjungia relė, kai per nuosekliai sujungtos su šildytuvo spirale relės ritę pradeda tekėti elektros srovė. Lemputė maitinama atskiru laidu. Šildytuvui sugedus ar dėl kitos priežasties nutrūkus šildytuvo spiralės maitinimui, srovė per relės ritę nustoja tekėti. Tokiu atveju geltonoji lemputė gęsta ir užsidega raudonoji lemputė, pranešanti apie šildytuvo schemos gedimą. Analogiškai gali būti naudojamas magnetinis indikatorius, leidžiantis taupyti elektros energiją (1.1.47 pav., c). Jei šildytuve numatytas šildymo intensyvumo keitimas, reguliuojant kaitinimo spiralės srovę, indikacijai tikslinga naudoti ampermetrą (1.1.47 pav., b).

1.1.4. Aukščiamatis

Aukštis matuojamas pagal vertikalę tarp orlaivio ir atskaitos paviršiaus Žemėje. Priklausomai nuo pasirinkto atskaitos paviršiaus skiriamas ***absoliutusis (QFE), tikrasis (QNH), standartinis (QNE)*** ir ***santykinis*** orlaivio skrydžio aukščiai (1, 2 pav.).

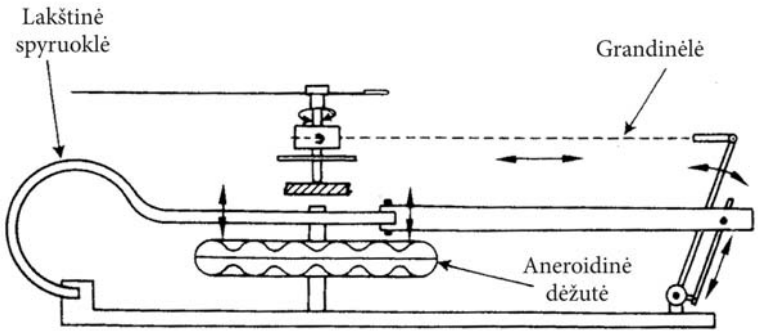
Absoliutusis aukštis *H* atskaitomas nuo vietovės, virš kurios orlaivis yra tam tikru laiko momentu, tikrasis aukštis H_T atskaitomas nuo jūros lygio, standartinis aukštis H_S atskaitomas nuo standartizuoto atskaitos (standartinės atmosferos) lygio, santykinis aukštis atskaitomas nuo kurios nors pasirinktos vietovės lygio, pavyzdžiui, nuo pakilimo arba tūpimo vietos.

Standartinis aukštis vertinamas kylant, tupiant ir palaikant aukštį skrydžio metu; absoliutųjį aukštį reikia žinoti visuose orlaivio skrydžio etapuose. Orlaivio skrydžio aukščio stabilizacijos režime reikia turėti informacijos apie aukščio ***nuokrypius*** nuo pasirinktos reikšmės.

Absoliutųjį skrydžio aukštį nuo Žemės paviršiaus vietos, virš kurios skrenda orlaivis, galima matuoti radijo aukščiamačiais. Tikrasis ir standartinis orlaivio aukščiai matuojami barometriniais aukščiamačiais.

Mechaniniai aukščiamačiai. Paprasčiausiai orlaivio aukštį (žr. 1.1.1 poskyrį) galima nustatyti aneroidiniu barometru, kurio principinė schema pateikta 1.1.48 pav. Pagrindinis barometro elementas yra aneroidinė dėžutė, kurios deformacijos, kintant slėgiui, perduodamos aukščio indikacijos rodyklei paprasto jungiamojo mechanizmo dėka.

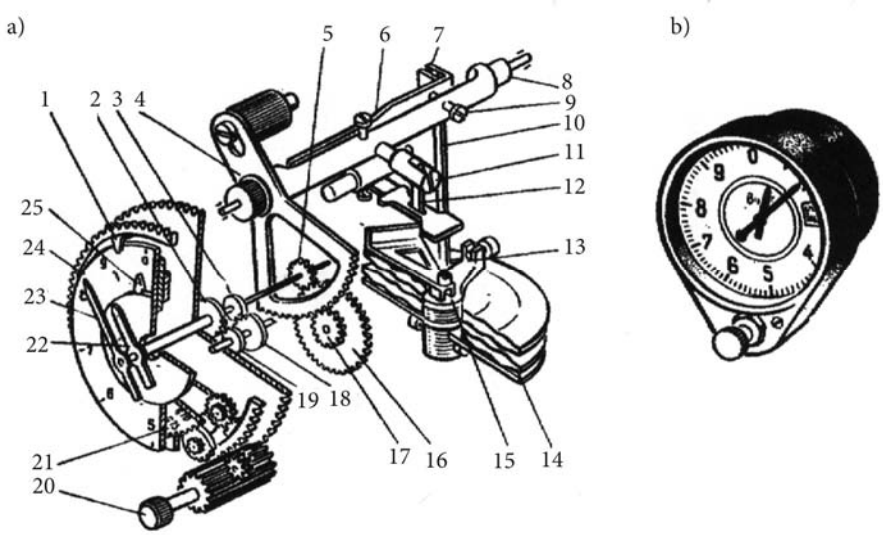
Kiekviename orlaivyje esantys mechaniniai aukščiamačiai sudaryti analogišku principu. Pagrindiniai mechaninio aukščiamačio mazgai yra: aneroidinė dėžutė – JE ir krumpliaratinė pavara – PDM. Hermetizuotas aukščiamačio korpusas sujungiamas su statinio atmosferinio slėgio davikliu.



1.1.48 pav. Aneroidinio barometro schema

Kintant statiniam slėgiui, JE standžiojo centro poslinkis per PDM perduodamas prietaiso rodikliui. Tiesinė priklausomybė tarp rodiklio rodmenų ir matuojamojo aukščio pasiekiama, naudojant aneroidines dėžutes su logaritmine slėgio charakteristika, sudaroma profiliuojant membranas. Tokie barometriniai aukščiamačiai matuoja orlaivio skrydžio aukštį nuo – 300 m iki 15 km ar net daugiau (nuo 1000 iki 50 000 pėdų).

1.1.49 pav. pateikta tokio tipo aukščiamačio kinetinė schema. Deformuojantis aneroidinėms dėžutėms *14*, jų standžiojo centro *15* poslinkis per bimetalinį pirmosios eilės termokompensatorių *13,* traukę *10*, šakutę *7* ir bimetalinį antrosios eilės termokompensatorių *6* perduodamas ašiai *8* su krumpliaračio sektoriumi *4.* Šis sektorius *4* pasisuka ir jo sukamasis judesys krumpliaračiais *17, 16, 5* perduodamas daug kartų apsisukančiai rodyklei *23*, kuri rodo aukštį skalėje *24* metrais. Rodyklė *22* rodo aukštį pagal vidinę skalę kilometrais. Ji pritvirtinta ant tuščiavidurės dantračio *2* ašies, kuris sujungtas su tribu *5* per žeminančiąją pavarą (krumpliaračiai *2, 10, 18, 3*).



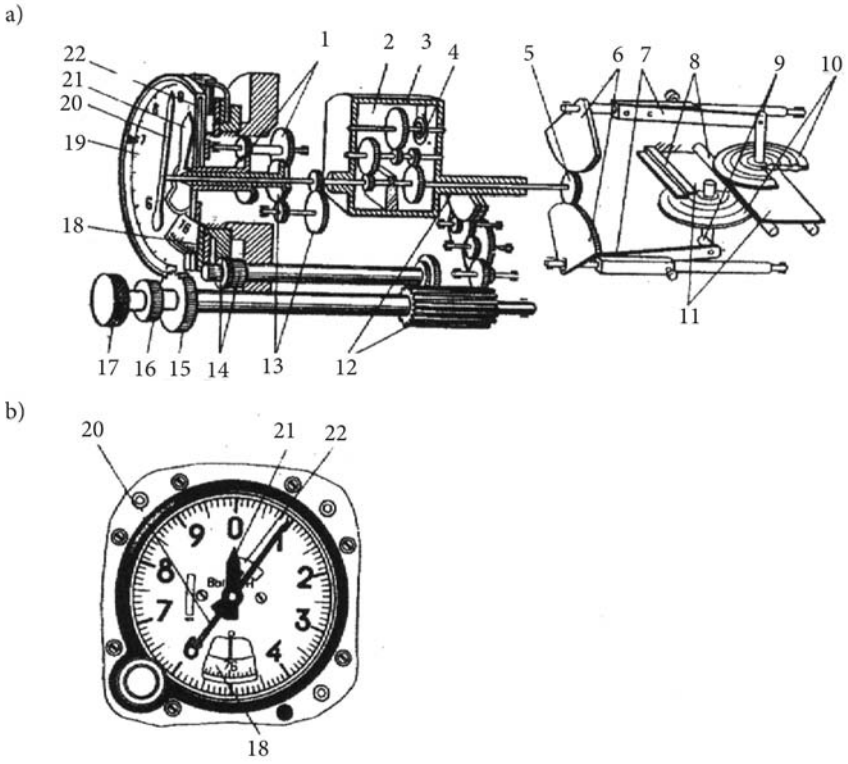
1.1.49 pav. Mechaninio aukščiamačio kinetinė schema (a) ir rodytuvas (b)

Priklausomai nuo matuojamojo aukščio diapazono krumpliaračių pavaros perdavimo santykis gali būti įvairus. Diapazonui iki 10 000 m perdavimas vyksta 1:10, o aukščiams iki 20 000 m – 1:20. Paslankus

balansavimo elementas *11* su trauke *12* ir priesvoris ant sektoriaus *4* skirti judančiosioms dalimis balansuoti, atsirandant pagreičiams skrydžio metu. Krumpliaračių pavarų laisvumai išbalansuojami tempiančiomis spyruoklėmis (1.1.49 pav. neparodyta). Atraminis varžtas *9* reikalingas temperatūros pokyčių kompensatoriaus *6* efektyviam ilgiui reguliuoti. Tam, kad prietaiso rodyklės grįžtų į nulinę padėtį, kintant atmosferiniam slėgiui, aukščiamačio mechanizmas padarytas pasukamu. Tai atliekama dantstiebiu *20*. Sukant dantstiebį, pasukama barometrinio slėgio skalė ir indeksai *1* bei *25*, rodantys aukštį nuo lygio su slėgiu 760 mm Hg stulpelio. Indeksas *1* rodo aukštį metrais (pėdomis), indeksas *25* – kilometrais (tūkstančiais pėdų).

Prieš orlaivio pakilimą aukščiamačio rodyklės dantstiebiu *20* nustatomos į nulinę padėtį. Tada barometrinėje skalėje *21* nurodomas slėgis, esantis aerodrome tam tikru momentu. Matuojant aukštį tūpimo vietos atžvilgiu, dantstiebiu *20* nustatomas tūpimo vietos barometrinis slėgis skalėje *21*.

Kita mechaninio barometrinio aukščiamačio kinetinė schema parodyta 1.1.50 pav.



1.1.50 pav. Mechaninio aukščiamačio kinetinė schema (a) ir rodytuvas (b)

Čia panaudotas (1.1.50 pav.) ***priešpriešinis*** dviejų vienodų aneroidinių dėžučių *10* sujungimas. Jis sudarytas per dvigubą alkūninę pavarą *9*. Panaudojus tokį JE, kenksmingieji inercinių jėgų momentai susibalansuoja, o naudingieji slėgio jėgų momentai susisumuoja. Kiekviena aneroidinė dėžutė per plokščiąją spyruoklę *11* tvirtinama ant bimetalinių strypų *8*, kurie atlieka pirmosios eilės terminių kompensatorių funkcijas. Antrosios eilės termokompensatoriai yra bimetalinės plokštelės *7*. Aneroidinių dėžučių deformacijos per dvigubą alkūninę pavarą ir sektorius *6* persiduoda tribui *5*. Tarp tribo *5* ir rodyklių *20, 21, 22* yra sukamasis multiplikatorius *2*, skirtas rodyklėms perduoti tribo *5* sukimą. Rodyklė *20* rodo aukštį metrais, rodyklė *21* – kilometrais, rodyklė *22* – dešimtimis kilometrų.

Multiplikatorius – tai planetarinė krumpliaračių pavara, kurios laisvumams pašalinti panaudota žiedinė spyruoklė (plaukas) *4*. Multiplikatoriaus pagrindas *3* gali būti pasukamas dantstiebiu *17* per reduktorių *12*. Tai daroma įvedant barometrinio aukščio pataisas kalibruojant aukščiamatį. Kai multiplikatoriaus pagrindas *3* nejudamas, jo perdavimo santykis leidžia maksimaliai pasukti rodyklę *20*, esant didžiausiam sektorių *6* pasisukimui. Antrosios rodyklės *21* sukimas atliekamas per žeminančiąją krumpliaratinę pavarą *13*. Trečioji rodyklė indekso pavidalu pasukama per žeminančiąją krumpliaratinę pavarą *1*. Sukant dantstiebį *17* per pa-

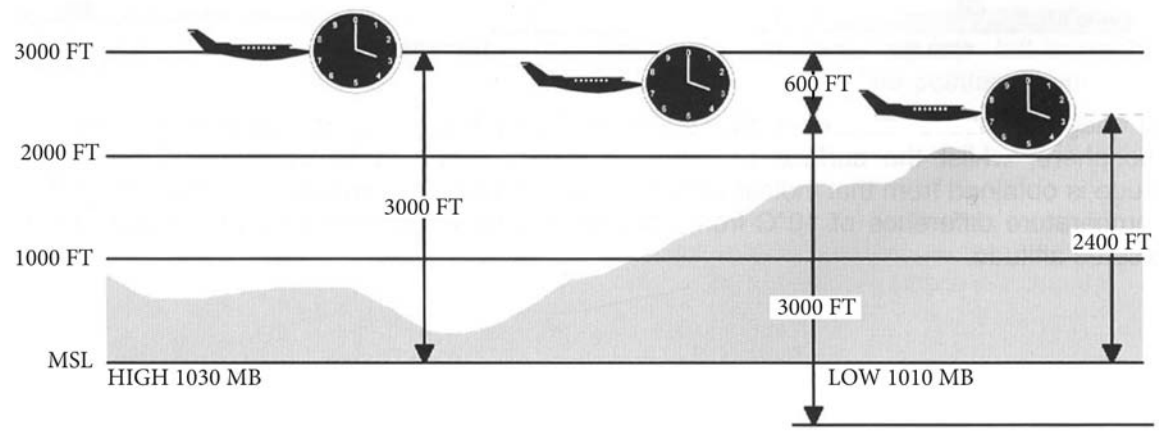
varą *14,* pasukama barometrinė skalė *18*, kuri matoma per langelį skalėje *19*. Rankenėle *16*, esančia vienoje ašyje su dantstiebiu, per krumpliaratį *15* reikiamo aukščio indeksas nustatomas į nulinę padėtį.

Aukščiamačiai suteikia informacijos ne tik apie orlaivio aukštį. Jį stebint, galima nustatyti orlaivio polinkį, palaikantį reikiamą skrydžio aukštį. Skrendant maršrutu ir tupiant, aukščiamatis yra vienas reikalingiausių prietaisų.

Anksčiau pateiktos barometriniu metodu aukščio nustatymo formulės pagrįstos tuo, kad tarp aukščio ir atmosferos parametrų egzistuoja standartinei atmosferai būdingos priklausomybės. Tačiau realios atmosferos parametrai (slėgis ir temperatūra) dažnai skiriasi nuo standartinės atmosferos davinių. Todėl pilotai dažnai naudoja santykinį aukštį pagal oro tankį, t. y. nuo lygio, kuriame yra temperatūra kitokia nei +15 °C. Šis aukštis geriausiai atspindi orlaivio padėtį jam įsibėgėjant, kylant ir tupiant. Kai oro sąlygos standartinės, pagal oro tankį nustatomas aukštis atitinka standartinį. Kai temperatūra žemesnė už standartinę, aukščio pagal tankį reikšmė bus mažesnė, o kai aukštesnė – didesnė.

Realiųjų oro sąlygų nuokrypiai nuo standartinės atmosferos parametrų sukelia ***metodines matavimų paklaidas***. Reikėtų skirti metodines paklaidas, atsirandančias dėl atmosferos parametrų ***neatitikimo*** standartui ir paklaidas dėl ***pasikeitusio vietos reljefo***. Paklaidos dėl atmosferos parametrų neatitikimo standartui gali būti dalijamos į paklaidas dėl ***slėgio*** pokyčių prie Žemės paviršiaus ir paklaidas dėl standartinio pasiskirstymo pagal aukštį ***temperatūros*** pokyčių.

Dėl vietos reljefo pokyčių atsirandančioms metodinėms paklaidoms kompensuoti dažnai naudojami specialūs geografiniai žemėlapiai arba žinios perduodamos radiju. Taip įvedamos metodinės aukščiamačio pataisos.



1.1.51 pav. Aukščiamačių metodinės paklaidos kintant slėgiui

Metodinė paklaida ΔH_P, atsirandanti dėl slėgio P_0 pakitimų ΔP prie Žemės paviršiaus (1.1.51 pav.), gali būti įvertinta pagal (1.1.5) formulę, imant T_V = const. Pataisa aukščiamačiui bus lygi:

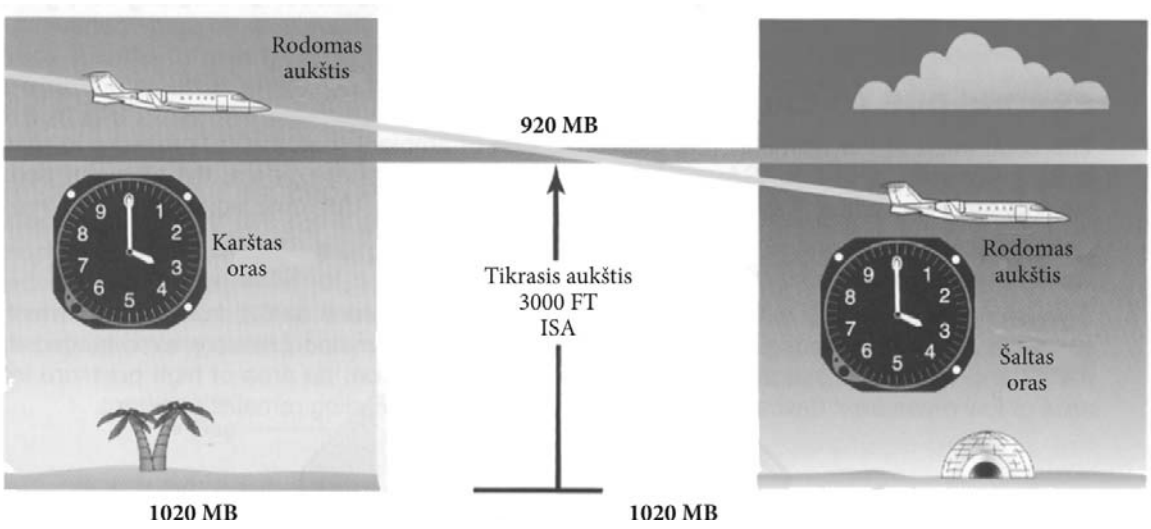
$$\Delta H_p = H - H_{pr} = \frac{R_s T_v}{g_0} \ln\left(1 + \frac{\Delta P}{P}\right), \tag{1.1.30}$$

čia H ir H_{pr} – faktinis aukštis ir prietaisu nustatomas aukštis.

Iš (1.1.30) formulės matyti, kad pataisa ΔH_p nepriklauso nuo slėgio skrydžio aukštyje ir vienoda visiems aukščio diapazonams. Ji įvedama į prietaiso rodmenis, pasukant skalių atžvilgiu dantstiebiu rodykles.

Metodinė ***temperatūrinė*** paklaida ΔH_T, kintant oro temperatūrai pagal aukštį (1.1.52 pav.), gali būti nustatyta analogiškai iš (1.1.5) formulės, kai P_0 = const ir temperatūra kinta nuo apskaičiuotosios reikšmės T_V iki faktinės reikšmės T_{Vf}:

$$\Delta H_T = H_{pr} - H = \frac{R_s}{g_0} \ln \frac{P_0}{P} \left(T_v - T_{vf}\right). \tag{1.1.31}$$



1.1.52 pav. Aukščiamačių temperatūrinės metodinės paklaidos

Padalijus reikšmes H_{pr} ir H, gaunama:

$$H = H_{pr}\frac{T_f}{T_v}. \tag{1.1.32}$$

Iš (1.1.30) formulės matyti, kad, norint nustatyti aukštį H, reikia prietaiso rodmenis H_{pr} padauginti iš santykio $\frac{T_{vf}}{T_v}$. Temperatūrą aukšyje H galima išmatuoti skrydžio metu, o davinius apie temperatūrą prie Žemės galima gauti per radiją.

Mechaninių aukščiamačių vadinamosios ***prietaiso*** paklaidos turi tą pačią kilmę ir kompensuojamos analogiškai kaip ir deformaciniuose manometruose. Didžiausią įtaką turi temperatūrinės paklaidos. Tai atsiranda dėl to, kad temperatūrinis aukščiamačių darbo diapazonas yra nuo –60 iki +60 °C, o aukščiamačiai sugraduojami normalioje temperatūroje.

Didžiausią įtaką prietaiso rodmenims turi aneroidinių dėžučių medžiagos stangrumo modulio pokyčiai, kintant temperatūrai. Pasikeitus temperatūrai dydžiu ΔT, temperatūrinė paklaida sudarys:

$$\Delta P_T = -\beta_E P \Delta T\,, \tag{1.1.33}$$

čia β_E – stangrumo modulio temperatūrinis koeficientas.

Jeigu išreikštume paklaidą ΔP_T per temperatūrinę paklaidą $\Delta H\beta$ aukščio vienetais, galėtume gauti išraišką:

$$\Delta P_T = \Delta H_\beta \zeta_H\,, \tag{1.1.34}$$

čia $\zeta_H = \frac{dP}{dH}$ – barometrinis gradientas.

Aukščiams $0 \le H \le 11\,000$ m:

$$\zeta_H = \frac{P_0 g_0}{R_s T_0}\left(1 - \frac{\tau_a H}{T_0}\right)^{\frac{g_0}{\tau_a R_s}-1}. \tag{1.1.35}$$

Spręsdami (1.1.25–1.1.27) lygtis kartu, gausime:

$$\Delta H_\beta = A\Delta T - BH\Delta T\,, \tag{1.1.36}$$

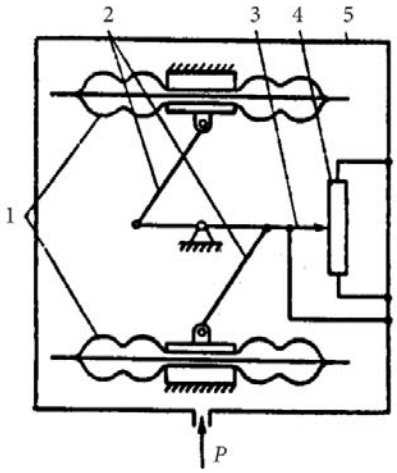
čia $A = \beta_E \frac{R_s T_0}{g_0}$; $B = \beta_E \frac{R_s \tau_a}{g_0}$.

Iš išraiškos (1.1.36) matyti, kad instrumentinė temperatūrinė paklaida susideda iš dviejų komponenčių, iš kurių viena nepriklauso nuo aukščio (vienoda visai skalei), o antroji yra proporcinga aukščiui ir priešinga pagal dėsningumą pirmajai komponentei.

Vadinamosios ***prietaiso*** paklaidos dėl temperatūros pokyčių kompensuojamos naudojant pirmosios ir antrosios eilės termokompensatorius. Pirmosios eilės termokompensatorius kompensuoja paklaidos komponentę $A\Delta T$, o antrosios eilės termokompensatorius – antrąją komponentę $B\Delta T$.

Prie vadinamųjų ***prietaiso*** mechaninių aukščiamačių paklaidų dar priskiriamos paklaidos dėl statinio slėgio pokyčių imtuve (dėl orlaivio aerodinamikos, skrydžio aukščio ir greičio bei imtuvo vietos). Šios paklaidos nustatomos eksperimentiškai, atliekant orlaivio bandymus, ir vertinamos, nustatant aukščiamačių sumines pataisas.

Elektromechaninių aukščiamačių sudarymo principai. Šiuose aukščiamačiuose proporcingas aukščiui slėgis keičiamas į elektrinį signalą. Tai daroma jungiant prie PDM išėjimo rodiklio vietoje reostato (kintamosios varžos) šliaužiklį. Tokie aukščiamačiai gali turėti tiesioginį rodiklį ir elektrinį išėjimą per keitiklį (slėgis–įtampa). Paprasčiausias yra ***potenciometrinis*** aukščio keitiklis (1.1.53 pav.), kurio išėjimo signalas proporcingas santykinei varžai, lygiai santykiui tarp varžos potenciometro išėjime su jo pilnutine varža ($P \to U \to \frac{R_1}{R_P}$).

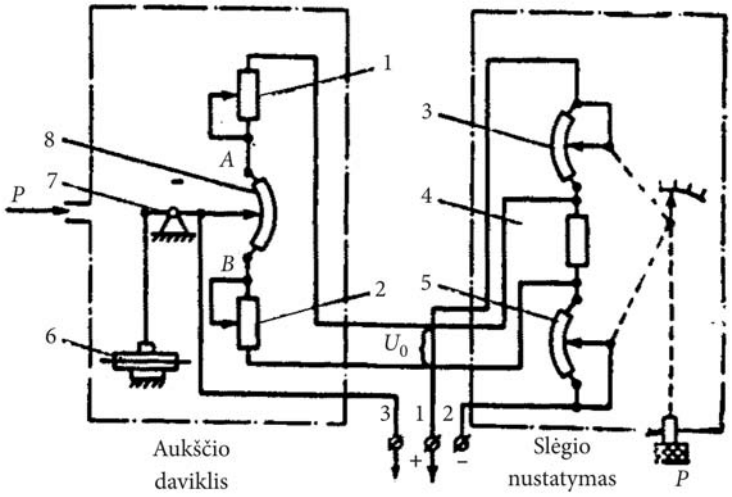


1.1.53 pav. Potenciometrinis aukščio keitiklis

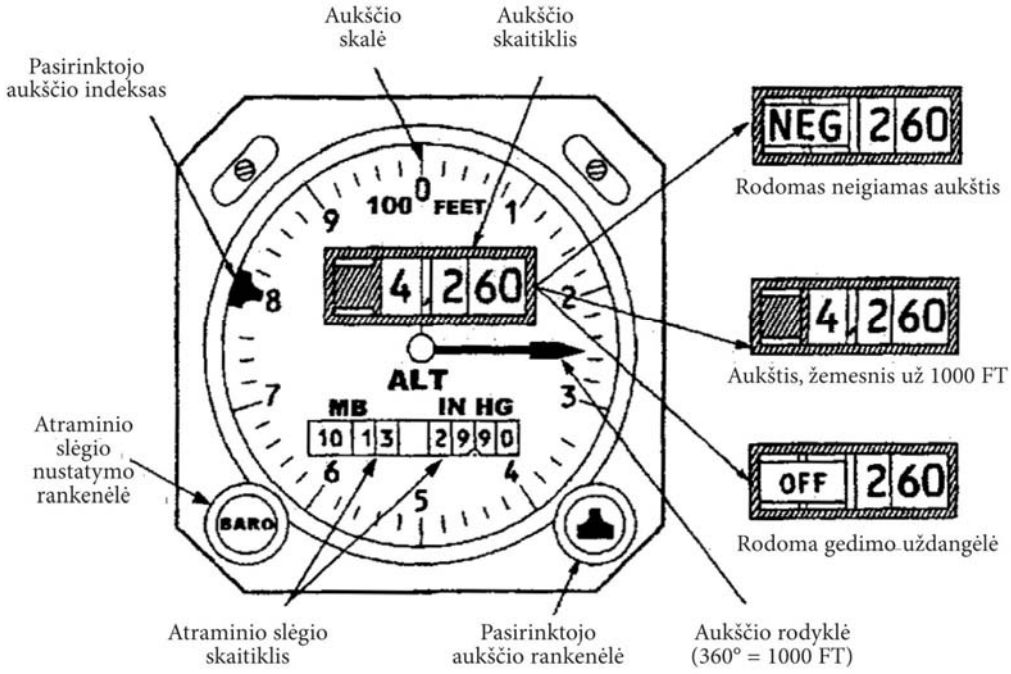
Šiame keitiklyje naudojamos priešingai sujungtos aneroidinės dėžutės *1* yra hermetiškame korpuse *5*. Priešingas aneroidinių dėžučių sujungimas kompensuoja linijinių ir vibracinių perkrovų įtaką keitikliui. Kintant aukščiui, aneroidinių dėžučių *1* standžiųjų centrų poslinkiai per alkūnines pavaras *2* keičiami į potenciometro *4* šliaužiklio *3* kampinį poslinkį. Prietaise nenumatoma galimybė įvesti barometrinį slėgį Žemės paviršiuje.

1.1.54 pav. pateikta principinė elektrinė ***barometrinio*** aukščio keitiklio schema su galimybe tam tikru davikliu nustatyti slėgį Žemės paviršiuje.

Slėgis *P* jaučiamas aneroidine dėžute *6* ir perduodamas PDM *7* potenciometro *8* šliaužikliui. Žemės paviršiaus lygio barometrinio slėgio reikšmė įvedama iš slėgio daviklio nuotoliniu būdu, pasukant rankenėlę skalės centre arba tiesiogiai dantstiebiu. Reostatų *3, 5* varžos leidžia keisti taškų *A* ir *B* elektrinius potencialus lygiais dydžiais, nekeičiant įtampos kritimo U_0 ant šunto *4* varžos. Taip įvedama matuojamojo skrydžio aukščio pataisa pagal kintantį prie Žemės paviršiaus slėgį P_0. Keitiklio išėjimo signalas, proporcingas skrydžio aukščiui, nuimamas nuo kontaktų *1, 3*. Potenciometrai *1, 2* naudojami reguliavimui. Potenciometriniai skrydžio aukščio keitikliai gali būti pritaikyti fiksuotajam aukščio lygiui signalizuoti.



1.1.54 pav. Potenciometrinis aukščio keitiklis su Žemės paviršiaus slėgio davikliu



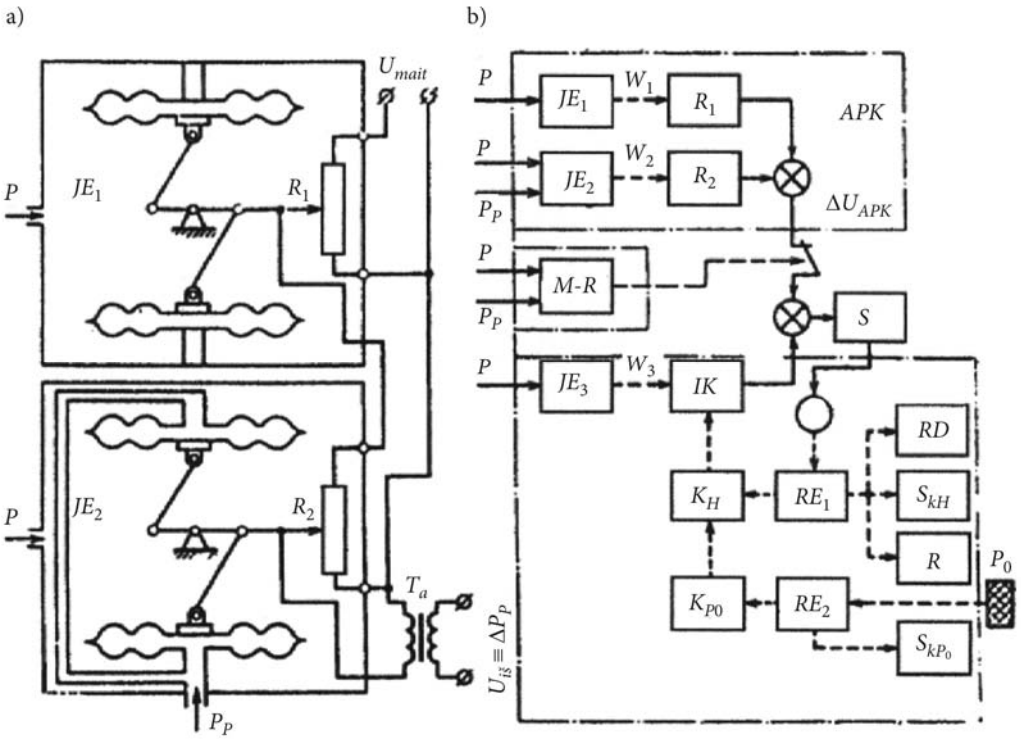
1.1.55 pav. Elektromechaninio aukščiamačio indikatorius

Elektromechaninio aukščiamačio, turinčio vizualų (1.1.55 pav.) ir elektrinį išėjimus, struktūrinė schema pateikta 1.1.56 pav., b.

Kadangi prietaise yra elektrinis matuojamojo aukščio analogas, jame atliekamas aerodinaminių paklaidų kompensavimas. Aerodinaminės aukščiamačio paklaidos, matuojant aukštį skrydžio metu, priklauso nuo orlaivio atakos kampo β, oro srauto greičio V ir oro slėgio P skrydžio aukštyje. Apytikriai galima teigti, kad tarp dinaminės paklaidos ΔP_a bei parametrų V ir P egzistuoja funkcinis ryšys. Aerodinaminių ***paklaidų kompensatorius*** (APK) (1.1.56 pav., a) priima dinaminį $P_d = (P_p - P)$ bei statinį P slėgį ir nustato esamą priklausomybę pagal išraišką $\Delta P_a = f_1(P)\ f_2(P_d)$.

Funkcijų $f_1(P)$ ir $f_2(P_d)$ pavidalas kiekvienam orlaiviui nustatomas eksperimentiškai. Jos formuojamos aneroidinėmis JE_1, manometrinėmis dėžutėmis JE_2 ir profiliuotaisiais potenciometrais R_1, R_2.

Funkcijų sudauginimas atliekamas sujungiant potenciometrų schemas. Kompensatoriaus išėjimo signalas, proporcingas paklaidai ΔP_a, perduodamas per transformatorių T_a.



1.1.56 pav. Aerodinaminių paklaidų kompensatorius (a) ir jo taikymo aukščiamatyje (b) schema

Kompensatorius kompensuoja slėgio imtuvo paklaidas, esant skrydžio greičiui $M < 1$. Jei greitis tampa didesnis už M (machą), kompensatorius M rele (M-R) atjungiamas. Slėgio reikšmė prie žemės P_0 į schemos funkcinį įtaisą K_{P0} įvedama rankiniu būdu – dantstiebiu iš rodytuvo priekinės panelės ir kontroliuojama pagal skaitiklį S_{kP_0}, susietą su dantstiebiu per reduktorių RE_2. Didėjant aukščiui, statinis slėgis P_a matuojamas aneroidinių dėžučių bloku JE_3, kurių standžiojo centro poslinkis W_3 perduodamas judamajam indukcinio keitiklio IK inkarui. Indukcinio keitiklio IK išėjimo signalas U_3 sumuojamas su kompensatoriaus išėjimo signalu ΔU_{APS} ir per stiprintuvą S perduodamas į variklio V valdymo apvijas. Variklis per reduktorių RE_1 ir funkcinį įrenginį K_H perstumia keitiklio IK šerdį iki subalansuotos padėties $U_3 = 0$. Tuo pat metu variklis V per reduktorių RE_1 veikia rodyklę RD, skaitiklį S_{kH} ir išėjimo potenciometro R šliaužiklį. Kinetinėje aukščiamačio rodytuvo schemoje įjungti I ir II eilės termokompensatoriai.

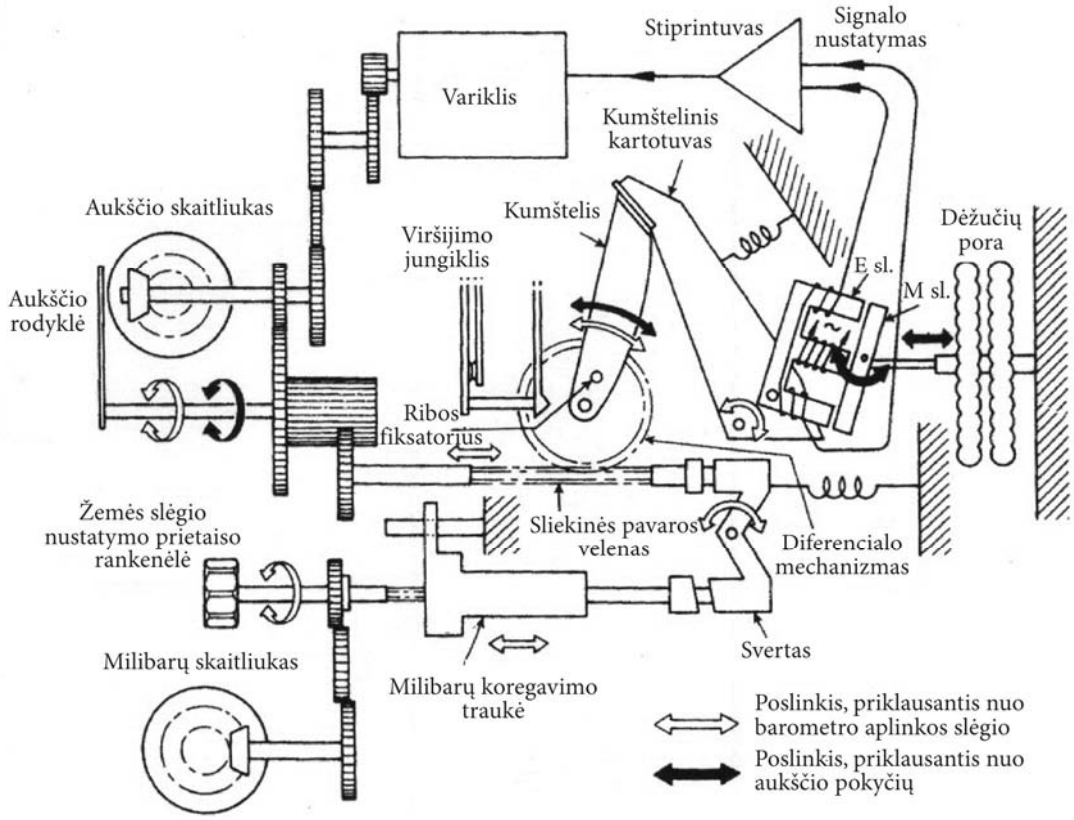
Aukščio korektoriai. Kad būtų garantuojamas skrydžių saugumas, kiekvienam orlaiviui skrydžio metu nurodomas aukščio intervalas (ešelonas), atskaitomas Žemės paviršiaus slėgio P_0 = 760 mm Hg stulpelio atžvilgiu. Dviejų priešingomis kryptimis skrendančių orlaivių aukščio ešelonai parenkami įvertinant reglamentuojamą minimalųjį saugumo zonos plotį, abiejų orlaivių aukščiamačių paklaidas, padvigubintą aerodinaminę paklaidą, imant statinį slėgį oriniais slėgio imtuvais, ir padvigubintą nurodyto aukščio stabilizavimo paklaidą.

Signalai, proporcingi orlaivio nukrypimui nuo nurodyto aukščio, gaunami prietaisais, vadinamaisiais ***aukščio korektoriais***. Šių aukščio korektorių naudojimo schemos numato iš aukščio korektoriaus gaunamų signalų panaudojimą į autopilotų sudėtį įeinančiose orlaivio aukščio stabilizavimo sistemose. Aviacijoje naudojami aukščio korektoriai (AK) ir aukščio korekcijos davikliai (KAD).

Panagrinėsime aukščio korektoriaus AK veikimo principą pagal pateiktą (1.1.57 pav.) funkcinę schemą.

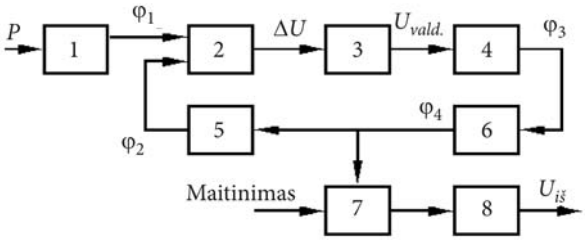
Kintant aukščiui, aneroidinių dėžučių standžiųjų centrų poslinkiai per PDM perduodami posūkio kampo φ_1 pavidalu į induktyvinio keitiklio judamąją antrinę apviją. Pirminė induktyvinio keitiklio (IK) apvija, variklio ir reduktorių I ir II dėka pasisuka antrinės apvijos atžvilgiu. Orlaiviui nukrypus nuo nurodyto aukščio H dydžiu ΔH, signalas ΔU, proporcingas šiam nuokrypiui, su faze, atitinkančia nuokrypio

ženklą, patenka į stiprintuvo įėjimą. Iš stiprintuvo valdantysis signalas U_{vald} patenka į valdančiąsias elektrinio variklio apvijas. Variklis per du reduktorius kampu φ_2 pasuka indukcinio keitiklio pirminę apviją iki subalansavimo kampo (t. y. lygybės $\varphi_1 = \varphi_2$).



1.1.57 pav. Tipinė aukščio korektoriaus funkcinė schema

KAD tipo korektorius realizuojamas analogiškai, skirtumas tas, kad aukščio korekcijos daviklis papildomai turi elektromagnetinę movą ir potenciometrą, kurių dėka suformuojamas korekcijos signalas (1.1.58 pav.).



1.1.58 pav. Aukščio korekcijos daviklio blokinė schema:
1 – JE ir PDM; 2 – indukcinis keitiklis; 3 – stiprintuvas; 4 – variklis;
5 – reduktorius II; 6 – reduktorius I; 7 – elektromagnetinė mova;
8 – potenciometras

Numatyti du korektoriaus KAD darbo režimai: suderinimo ir korekcijos. Suderinimo režime elektromagnetinė mova atjungta, centruojančiosios spyruoklės palaiko potenciometro šliaužiklį vidutinėje nulinėje padėtyje, todėl korektoriaus išėjime nėra signalo. Įjungus movą į korekcijos režimą, atliekamas reduktoriaus *I* išėjimo ašies pasukimo kampo φ_4 perdavimas potenciometro šliaužikliui, kurio išėjimo signalas $U_{iš}$, proporcingas pagal dydį ir fazę aukščio nuokrypiui nuo nurodytos reikšmės. Išjungus movą, spyruoklės grąžina potenciometro šliaužiklį į vidutinę nulinę padėtį.

1.1.5. Orinio greičio indikatorius

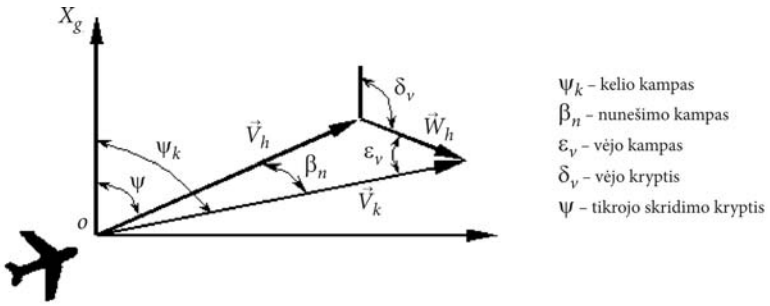
Orlaivio skrydį apibūdina indikatorinis (prietaiso) V_i (IAS), kalibruotasis V_c (CAS), (EAS) tikrasis V (TAS), kelio V_k ir vertikalusis V_v greičiai. Pilotuojant orlaivį reikia žinoti visus šiuos greičius.

Indikatorinis (prietaiso) orinis greitis V_i ***(Indicated air speed)*** atitinka dinaminio slėgio dydį, nuo kurio reikšmės priklauso aerodinaminės jėgos, veikiančios orlaivį, jo stabilumo bei valdymo charakteristikos, minimalus saugaus skrydžio greitis. Stebimojo greičio reikšmių laikomasi automatizuotai valdant skrydžio greitį, parenkant optimalias skrydžio ir variklių veikimo charakteristikas.

Kalibruotasis orinis greitis V_c ***(Calibrated air speed)*** – tai indikatorinis orinis greitis sukalibruotas (patikslintas), įvertinus konkretaus orlaivio statinio slėgio matavimo paklaidas, kurios priklauso nuo statinio slėgio imtuvų vietos orlaivio paviršiuje ir oro srauto aptekėjimo savybių toje vietoje.

Tikrasis orinis greitis V ***(True air speed)*** yra orlaivio greitis supančio oro atžvilgiu. Jis taikomas įveiktam keliui arba iki skrydžio tikslo likusiam keliui apskaičiuoti, kai žinomi vėjo parametrai, arba vėjo parametrams apskaičiuoti, žinant kelio greitį V_k, optimalioms kilimo charakteristikoms pasirinkti bei automatinio orlaivio valdymo sistemoms reguliuoti visais skrydžio etapais. Matuojant tikrąjį orinį greitį, įvertinamas ne tik oro pasipriešinimas, bet ir jo tankis bei temperatūra.

Kelio greitis $\vec{V}_k$ ***(Ground speed)*** atitinka orlaivio masių centro, suprojektuojamo taško pavidalu į horizontalųjį Žemės paviršių, judėjimo greitį šiame paviršiuje. Kelio greitis $\vec{V}_k$ lygus tikrojo orinio greičio $\vec{V}_h$ ir vėjo greičio $\vec{V}_h$ horizontaliųjų dėmenų geometrinei sumai: $\vec{V}_k = \vec{V}_h + \vec{W}_h$. Vektoriai $\vec{V}_k, \vec{V}_h, \vec{W}_h$ sudaro ***navigacinį greičių trikampį*** (1.1.59 pav.).



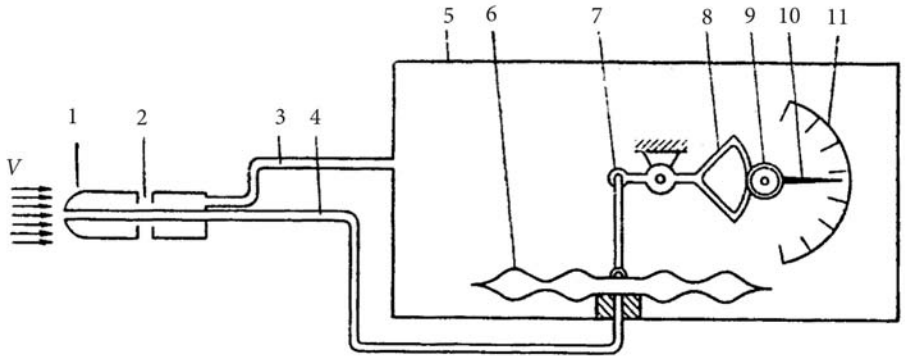
1.1.59 pav. Navigacinis greičių trikampis:
ψ_k – kelio kampas; β_n – nunešimo (nuonašos) kampas; ε_v – vėjo kampas;
δ_v – vėjo kryptis; ψ – tikroji skrydžio kryptis

Tikrasis orinis greitis yra vektorinis dydis, nustatomas pagal vektoriaus modulį ir jo kryptį. Su orlaiviu susietoje koordinačių sistemoje *OXYZ* vektoriaus $\vec{V}$ kryptis nustatoma pagal ***atakos*** α kampą ir ***nuonašos*** (slydimo) kampą β. Informaciją apie atakos ir slydimo kampus naudoja įvairūs „borto vartotojai“.

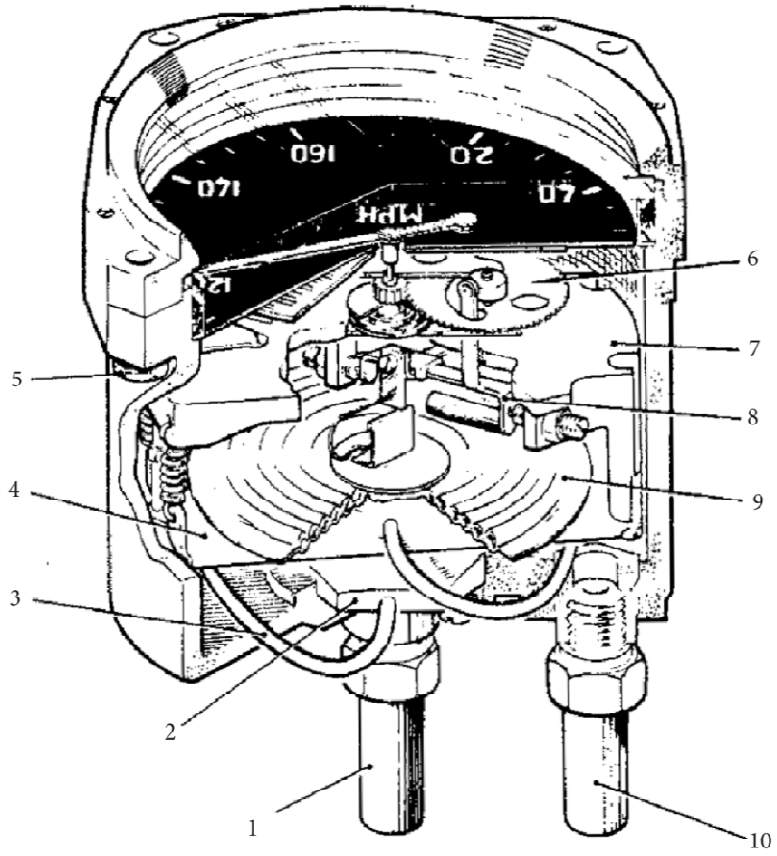
Bedimensė orlaivio skrydžio greičio charakteristika yra ***skaičius M (Macho skaičius)***. Skaičiaus *M* reikšmę žinoti būtina, nes artėjant prie garso greičio ($M \geq 0{,}7$) keičiasi orlaivio sparno aptakumo pobūdis, ir nuo šio skaičiaus *M* ima priklausyti orlaivio aerodinaminės charakteristikos. Taigi optimaliam orlaivio pilotavimo režimui palaikyti reikia žinoti skaičių *M*.

Kad išmatuotume ***indikatorinį*** orinį greitį V_i, reikia nustatyti slėgių P_p ir P skirtumą, lygų $P_{din.}$ Pilnutinį slėgį P_p priima pilnutinio slėgio imtuvas *1* (1.1.60 pav.).

Pro pneumatinį vamzdį *4* šis slėgis perduodamas į membraninę dėžutę *6*. Statinį slėgį *P* priima statinio slėgio imtuvas *2* ir pneumatiniu vamzdžiu *3* perduodamas į matuoklio korpusą *5*. Membraninės dėžutės standžiojo centro poslinkis per PDM, sudarytą iš alkūninio mechanizmo *7* ir krumpliaračių pavaros *8, 9,* perduodamas indikatoriaus skalės *11* rodyklei *10* (arba elektrinio keitiklio JE). Paprasto orinio greičio indikatoriaus konstrukcija pateikta 1.1.61 pav.

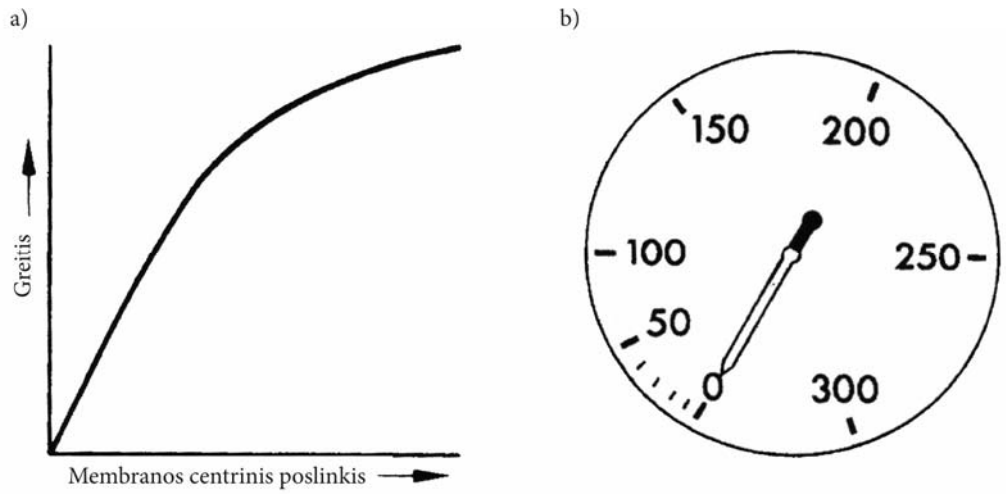


1.1.60 pav. Greičio indikatoriaus (GR tipo) principinė schema



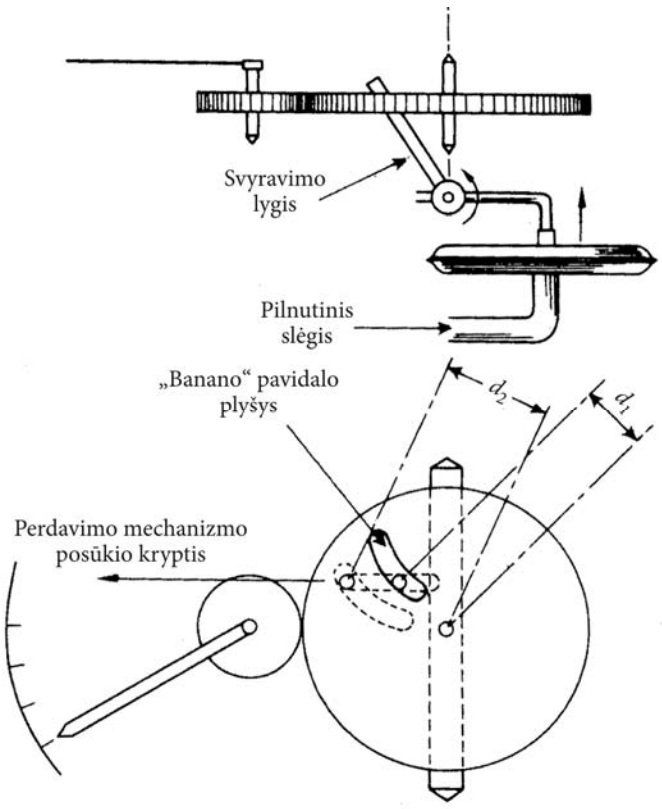
1.1.61 pav. Orinio greičio indikatoriaus konstrukcija: 1 – pilnutinio slėgio jungtis; 2 – pilnutinio slėgio atvamzdis; 3 – pneumatinis vamzdelis; 4 – membraninės dėžutės pagrindas; 5 – veržlė; 6 – rodyklės posūkio mechanizmas; 7 – rėmas; 8 – sukimo ašies mechanizmas; 9 – membraninė dėžutė; 10 – statinio slėgio poslinkis

Kadangi, kaip matyti iš indikatorinio orinio greičio (1.1.17) formulės, greičio priklausomybė nuo dinaminio slėgio pokyčių yra kvadratinė, t. y. dinaminiam slėgiui tolygiai kintant, jį atitinkančios orinio greičio reikšmės keisis pagal logaritminį (atvirkščią kvadratiniam) dėsnį, tai ir orinio greičio indikatoriaus skalė turi būti logaritminė 1.1.62 pav.



1.1.62 pav. Orinio greičio kitimas „tiesiniame“ indikatoriuje (a) ir jo skalės pavidalas (b)

Indikatoriaus matavimų skalei ***linearizuoti*** naudojami funkciniai jungiamieji mechanizmai, aprašyti 1.1.2 poskyryje. Pavyzdžiui, 1.1.63 pav. parodytas gana paprastas indikatoriaus rodyklės tolydinio valdymo mechanizmas.



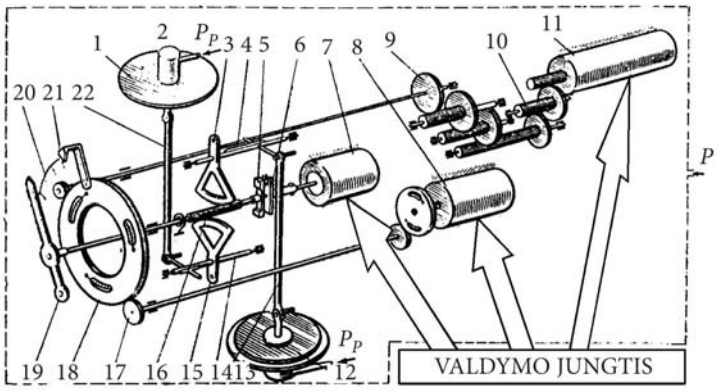
1.1.63 pav. Indikatoriaus rodmenų skalės kreivumo kompensavimo mechanizmas

1.1.64 pav. pateikta orinio greičio indikatoriaus su pasirenkamų reikšmių indeksu (GRI tipo) kinetinė schema.

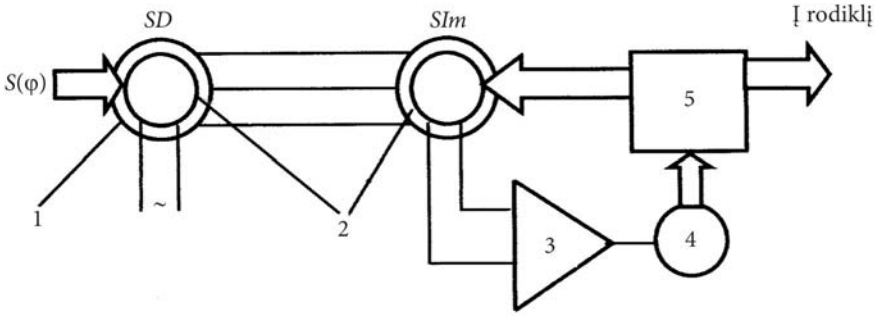
Aneroidinių dėžučių *1, 12* deformacijos, veikiant slėgių P_p ir P skirtumui jose ir korpuse *2*, keičiamos PDM (alkūninis mechanizmas *13, 22,* ašys *4, 14* su sektoriais *3, 15* ir tribas *16*) į sukamąjį rodyklės *19* judesį skalės *20* atžvilgiu. Tribas *16* per pavadėlį *5* ir įvorę *6* susietas su sinuso-kosinuso transformatoriaus *7* rotoriumi. Variklis *11* per reduktorių *9, 10* ir krumpliaratį *18* susietas su pasirenkamųjų V_i reikšmių indeksu *21*, o per krumpliaratį *18* ir reduktorių *17* – su sinuso-kosinuso transformatoriaus *8* rotoriumi, kurio

sukimasis sinchroniškas su indekso *21,* t. y. rotorinės apvijos magnetinio srauto kryptis atitinka kampinę indekso padėtį skalės atžvilgiu.

Informacijos perdavimo, naudojant selsininius variklius (sinuso-kosinuso transformatorius) apibendrintoji schema pateikta 1.1.65 pav.



1.1.64 pav. Greičio indikatoriaus (GRI tipo) kinetinė schema



1.1.65 pav. Informacijos perdavimas, naudojant sinuso-kosinuso transformatorių:
S (φ) – įėjimo signalas; *SD* – selsinas-daviklis; *SIm* – selsinas-ėmiklis;
1 – statorius; 2 – rotorius; 3, 4 – stiprintuvai; 5 – variklis

Transformatorių *7* ir *8* statorių apvijos sujungtos tarpusavyje. Srovių dydį ir kryptį transformatoriaus *7* statoriaus apvijoje nustato transformatoriaus *8* statoriaus apvijoje indukuojama EVJ. Šios srovės sukelia magnetinį srautą, kurio vektoriaus kryptis atitinka kampinę indekso *21* padėtį. Transformatoriaus *7* išėjimo signalo fazė ir dydis nustato skirtumą tarp nustatytos ir einamosios greičio reikšmių, nes kampinė transformatoriaus *7* rotoriaus padėtis priklauso nuo ***kintamosios greičio*** reikšmės. Indekso padėčiai valdyti į variklio valdymo apviją tiekiama įtampa.

Indikatorinio orinio greičio V_i matavimo vadinamosios ***prietaiso paklaidos*** analogiškos anksčiau nagrinėtoms aukščiamačių paklaidoms. Didžiausią įtaką matavimų rezultatams turi paklaidos dėl trinties ir temperatūros poveikio.

Slėgio vienetais paklaida dėl trinties bus lygi:

$$\Delta P_{din.tr.} = \frac{F_{red.tr.}}{S_{ef}}, \tag{1.1.37}$$

čia S_{ef} – efektyvusis JE plotas; $F_{red.tr.}$ – redukuotoji trinties jėga.

Greičio vienetais ši paklaida:

$$\Delta V_{i.tr.} = \frac{F_{red.tr.}}{S_{ef}\rho_0 V_i}. \tag{1.1.38}$$

Siekiant sumažinti trinties paklaidas, tikslinga naudoti membraninės dėžutes, kurių slėgio charakteristikos netiesinės, ir PDM, kurio perdavimo santykis pastovus. Jei naudojami JE, kurių gofro profilis toks, kad standžiojo centro poslinkis tiesiog proporcingas greičio V_i kitimui ir PDM, kurių perdavimo santykis pastovus, – gaunama tiesinė skalės lygtis $\alpha = f(V_i)$.

Temperatūrinė prietaiso paklaida $\Delta P_{din.t}$ paaiškinama membraninio JE stangrumo modulio temperatūrinės priklausomybės įtaka.

Slėgio vienetais ši paklaida:

$$\Delta P_{din.t} = -P_{din.}\,\beta_E \Delta T, \tag{1.1.39}$$

čia β_E – temperatūrinis stangrumo modulio koeficientas; ΔT – oro aplinkos temperatūros kitimas.

Greičio vienetais paklaida:

$$\Delta V_{it} = -\frac{1}{2}\beta_E V_i \Delta T. \tag{1.1.40}$$

Santykinė temperatūrinė paklaida nepriklauso nuo greičio:

$$\frac{\Delta V_i}{V_i} = -\frac{1}{2}\beta_E \Delta T. \tag{1.1.41}$$

Šios paklaidos sumažėja, taikant bimetalinius terminius kompensatorius.

Kartais indikatorinio greičio matavimo prietaisais matuojamas skrydžio tikrasis orinis greitis V. Tai atliekant, gali atsirasti metodinių paklaidų, nes V_i matavimo prietaisas sugraduojamas normaliomis sąlygomis. Keičiantis skrydžio aukščiui, šios sąlygos keičiasi. Siekiant gauti tikrojo orinio greičio V reikšmes, būtina gaunamus matavimo rezultatus koreguoti pagal ***oro tankio ir spūdumo*** pokyčius.

1.1.6. Tikrojo orinio greičio ir Macho skaičiaus nustatymas

Pagal (1.1.15) lygtį randamas ***tikrojo orinio*** greičio dydis:

$$V = \sqrt{2R_s T\left(\frac{k}{k-1}\right)\left[\left(\frac{P_m}{p}+1\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right]}, \tag{1.1.42}$$

čia R_s – santykinė dujų pastovioji (duota reikšmė); P_m – arba P_{din}, arba P_p.

Kadangi skrydžio aukštyje netrikdytos aplinkos temperatūrą T išmatuoti sudėtinga, nustatoma sustabdytojo oro srauto temperatūra T_T. Ryšį tarp šių temperatūrų išreiškia tokia priklausomybė:

$$T_T = \left(\frac{k-1}{k}\right)\frac{v^2}{2R_s} + T\,. \tag{1.1.43}$$

Įvertinus šią priklausomybę:

$$V = \sqrt{2R_s \frac{k}{k-1} T_T\left[1 - \left(\frac{P_{din}}{p}+1\right)^{\frac{1-k}{k}}\right]}. \tag{1.1.44}$$

Kadangi garso greitis $a = \sqrt{kR_s T}$, taikant (1.1.42) išraišką, gaunama:

$$M = \frac{V}{a} = \sqrt{\frac{2}{k-1}\left[\left(\frac{P_{din}}{p}+1\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right]}. \tag{1.1.45}$$

Kai M >1, dalis dinaminio slėgio energijos sunaudojama susidarant smūginėms bangoms. Vertinant šį reiškinį, dydis P_{din} nustatomas pagal (1.1.16) formulę:

$$P_{din} = P\left\{\left[\frac{(k+1)}{k}M^2\right]^{\frac{k}{k-1}}\left[\frac{k+1}{2kM^2-(k-1)}\right]^{\frac{1}{k-1}}-1\right\}. \quad (1.1.46)$$

Iš pateiktų formulių matyti:

– norint nustatyti tikrąjį orinį skrydžio greitį V, reikia išmatuoti slėgius P_{din} ir P bei temperatūrą T skrydžio aukštyje;

– skaičiui M rasti reikia išmatuoti tik slėgius P_{din} ir P.

Tikrojo orinio greičio matuokliai. Jie skiriasi nuo indikatorinio greičio V_i matavimo prietaisų tuo, kad juose naudojamas kompensavimo mazgas, įvedantis ***pataisas pagal temperatūros ir statinio slėgio pokyčius skrydžio aukštyje***. Tai atliekama, keičiant perdavimo koeficientą tarp indikatorinio greičio ir tikrojo orinio greičio ašių. Statiniam slėgiui matuoti naudojama aneroidinė dėžutė, o temperatūrai matuoti galima naudoti termometrą.

Mechaniniuose tikrojo orinio greičio indikatoriuose temperatūros kitimo pataisos įvedamos ne tiesiogiai, o pagal oro statinio slėgio ir temperatūros tarpusavio ryšio funkciją, kuri nustatoma iš (1.1.11) išraiškos, taikomos nespūdžiajai oro aplinkai, atsižvelgiant į dujų būsenos lygtį $\rho = \frac{P}{R_s T}$:

$$V = \sqrt{\frac{2R_s T P_{din}}{P}}. \quad (1.1.47)$$

Oro temperatūros orlaivio išorėje reikšmė T apskaičiuojama pagal priklausomybę $T = T_0\left(\frac{P}{P_0}\right)^{0,2}$,

čia T_0, P_0 – standartinės atmosferos žemės paviršiuje parametrai.

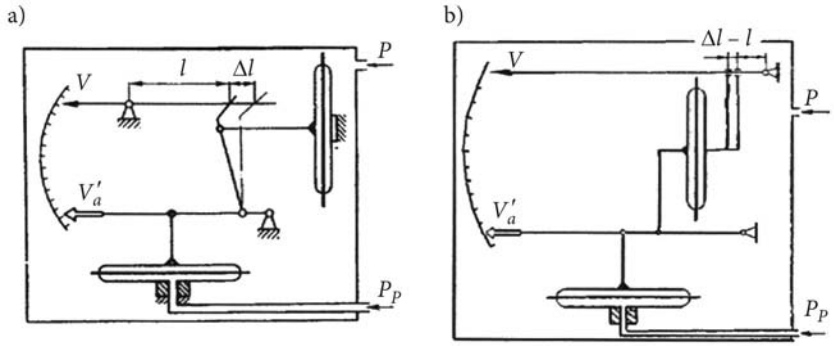
Atsižvelgiant į šią išraišką, (1.1.47) formulė tampa:

$$V = P_0^{-0,1}\sqrt{2R_s T_0}\,\frac{P_{din}^{0,5}}{P^{0,4}}. \quad (1.1.48)$$

Iš (1.1.48) formulės matyti, kad norint išmatuoti greitį V pakanka išmatuoti slėgius P_{din} ir P. Tačiau manometrinės dėžutės jautrumo charakteristika turi būti proporcinga dydžiui $P_{din}^{0,5}$, o aneroidinės dėžutės – dydžiui $P^{0,4}$. Toks temperatūros vertinimo būdas nėra absoliučiai tikslus, nes numatomas temperatūros ir slėgio kitimas vyksta pagal standartinės atmosferos modelį.

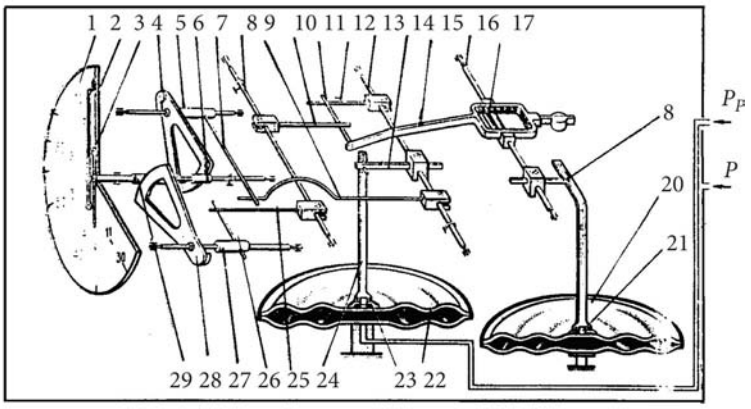
Greičio V matavimo prietaisai, ***pagrįsti netiesiogine*** temperatūrinės kompensacijos schema, ***vadinami kombinuotaisiais*** greičio indikatoriais (1.1.66 pav.). Šie greičių indikatoriai taip vadinami todėl, kad juose (1.3.64 pav.) greičių V_i ir V indikatorius vienas (sutapdintasis), o rodmenis žymi skirtingos rodyklės. Pagal plačiąją rodyklę atskaitomas greitis V_i, o pagal siaurąją – greitis V.

Konstrukcijos atžvilgiu šie prietaisai skiriasi pagal nuo aukščio slėgio ir temperatūros priklausančių pataisų įvedimo mazgo sandarą. Paprastai jis būna su nejudamąja (1.1.66 pav., a) arba judamąja (1.1.66 pav., b) aneroidine dėžute. Aneroidinės dėžutės deformacijų perdavimo santykis kinta, keičiant PDM peties ilgį l dydžiu Δl.



1.1.66 pav. Kombinuotųjų greičio indikatorių principinės schemos:
a – su nejudamąja; b – su judamąja aneroidine dėžute

Kombinuotojo greičio indikatoriaus su nejudamąja aneroidine dėžute kinetinė schema pateikta 1.1.67 pav. Šiame prietaise tikrasis orinis greitis atskaitomas pagal rodyklės *3*, o indikatorinis greitis – pagal rodyklės *2* rodmenis. Didėjant greičiui, aneroidinės dėžutės *22* standusis centras *23* pasislenka ir per traukę *24*, alkūnę *14*, ašį *13* ir pavadėlius *9, 7* veikia ašį *5*. Ant ašies 5 pritvirtintas krumpliaračio sektorius *4* pasuka tribą *6* su rodykle *2*.

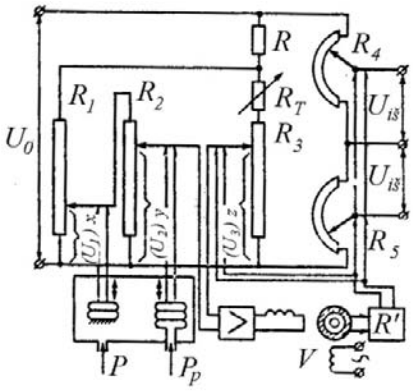


1.1.67 pav. Kombinuotojo greičio indikatoriaus kinetinė schema

Kintant skrydžio aukščiui, deformuojasi ir aneroidinė dėžutė *20*. Jos standžiojo centro *21* poslinkis per traukę *19* ir alkūnę *18* transformuojasi į ašies *16* sukamąjį judesį. Per šakutę *17* šis sukamasis judesys persiduoda traukei *15* su pavadėliu *11,* kuriuo keičiami pavadėlių *10, 12* pečių ilgiai, taigi PDM perdavimo santykis. Pavadėliais *10–12* ašies *13* sukamasis judesys persiduoda ašiai *8*. Savo ruožtu ašies *8* sukimasis per pavadėlius *25* ir *26* persiduoda ašiai *27* su sektoriumi *28*. Sektorius *28* pasuka tribą 29 ir ašį, ant kurios pritvirtinta rodyklė *3*. Ši rodyklė 3 rodo tikrąjį orinį greitį sugraduotoje skalėje. Ant rodyklės ir PDM ašių tvirtinamos juostinės spyruoklės, taip išvengiama mechanizmo laisvumo. Ašys subalansuojamos atsvarais. Visas mechanizmas yra korpuse, kurio išorėje įtaisyti du atvamzdžiai.

Greičio indikatorius matuoja orinį greitį 50–730 km/val. diapazone ir tikrąjį orinį greitį (400–1100) km/val. diapazone, kintant aukščiui nuo 0 iki 15 km. Kombinuotasis greičio indikatorius, sudarytas pagal 1.1.66 pav., b pateiktą principinę schemą, leidžia matuoti greitį V_i nuo 150 iki 1200 km/val., o greitį V – nuo 400 iki 1200 km/val., kintant aukščiui nuo 0 iki 15 km.

Tikslesnis tikrojo orinio greičio matavimas galimas pagal ***elektromechaninę*** schemą (1.1.68 pav.), kai ***temperatūra T_T įvertinama tiesiogiai*** pagal orlaivio išorėje įtaisytą termometrą.



1.1.68 pav. Principinė greičio *V* daviklio schema, kai temperatūra T_T matuojama tiesiogiai

Tokia schema atitinka (1.1.44) priklausomybę, pateikiamą taip:

$$V = N\sqrt{T_T}\left(\frac{P_{din}}{P}\right)^m, \tag{1.1.49}$$

čia $N = \sqrt{2R_s\frac{k}{(k-1)}}$ – pastovusis dydis; *m* – laipsnio rodiklis, parenkamas pagal sąlygą:

$$\left(\frac{P_{din}}{P}\right)^m = \sqrt{1-\left(\frac{P_{din}}{P}+1\right)^{\frac{1-k}{k}}}. \tag{1.1.50}$$

(1.1.49) priklausomybė 1.1.68 pav. schemoje realizuojama, keičiant išmatuotus dydžius T_T, P_{din} bei *P* į elektrinius signalus ir „elektromechaniniu būdu“ sudauginant elektrinių signalų dydžius, proporcingus $(1/P)^m, (P_{din.})^m, \sqrt{T_T}$. Temperatūra T_T matuojama termistoriumi R_T, slėgiai P_{din} ir *P* – manometrine ir aneroidine dėžutėmis, kurių deformacijos keičiamos potenciometrais *B1* ir *B2* į įtampas U_1 ir U_2.

Termistorius R_T įjungtas nuosekliai potenciometrui *B3* ir varinei varžai *R* – temperatūrinėms paklaidoms kompensuoti ir išėjimo įtampų masteliams reguliuoti. Potenciometro *B1* išėjime įtampa $U_1 = k_1(1/P)^m$. Potenciometro *B2* išėjime, esant kintamiesiems *P* ir P_{din}, įtampa $U_2 = k_2(P_{din.}/P)^m$. Potenciometras *B3* profiliuojamas taip, kad jo išėjime įtampa $U_3 = k_3 V/\sqrt{T_T}$. Potenciometrai *B1, B2, B3* reikiamai profiliuojami šunto ir papildomomis varžomis.

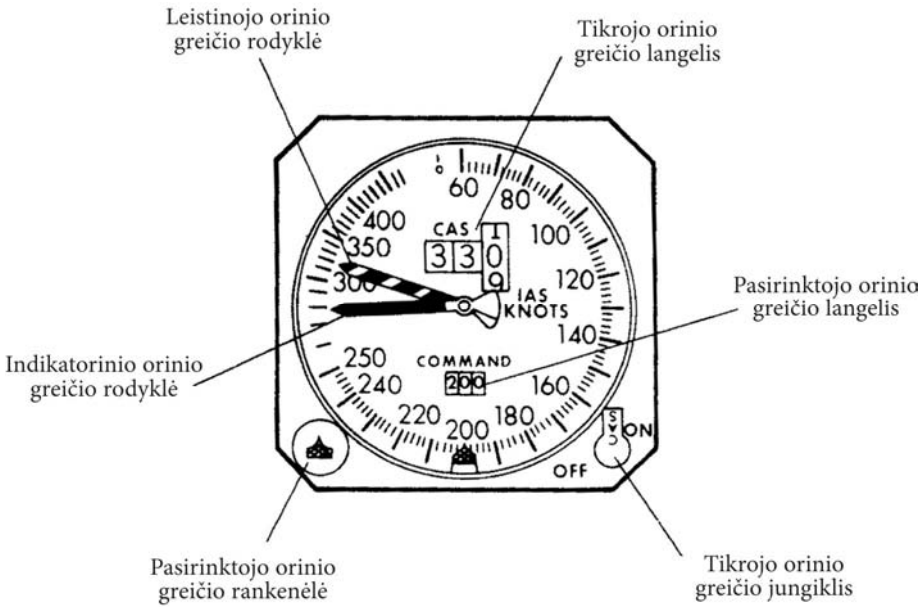
Kintant greičiui *V*, signalų skirtumas $U_2 - U_3$ stiprintuvu perduodamas į variklio valdymo apviją. Variklis per reduktorių *R* perstumia potenciometro *B3* bei išėjimo potenciometrų *B4* ir *B5* šliaužiklius iki padėties, kuriai esant pasiekiama lygybė $U_2 = U_3$.

Tada:

$$k_2\left(\frac{P_n}{P}\right)^m = k_3\frac{V}{\sqrt{T}}. \tag{1.1.51}$$

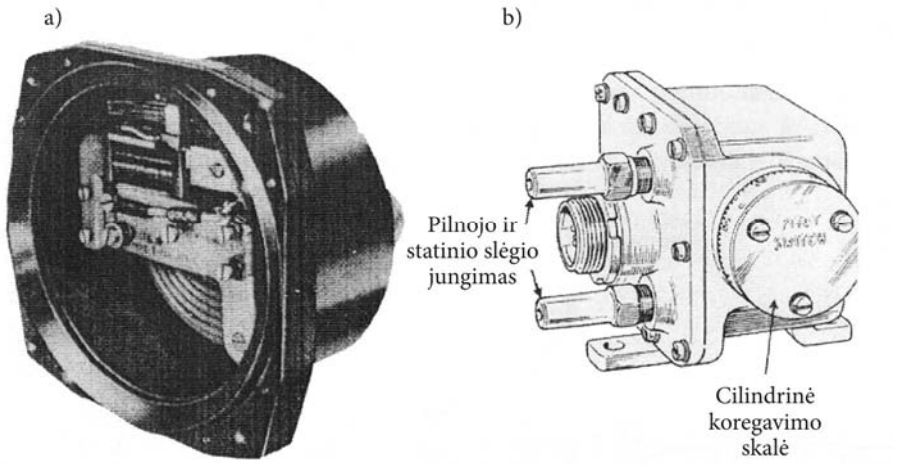
Ši lygybė atitinka pradinę (1.1.48) lygtį. Išėjimo signalai, gaunami potenciometrais *B4* ir *B5*, proporcingi tikrajam oriniam greičiui *V*.

Kombinuotojo orinio greičio matavimo prietaiso, matuojančio indikatorinį ir tikrąjį orinius greičius, duomenų rodiklis pavaizduotas 1.1.69 pav.



1.1.69 pav. Indikatorinio ir tikrojo orinių skrydžio greičių rodiklis

1.1.70 pav. pateikti tipiniai orinio greičio matavimo prietaisų komponavimo mazgai.



1.1.70 pav. Tipiniai skrydžio orinio greičio prietaisų mazgai: a – mažų ir didelių greičių matavimo elementų junginys; b – vienas bendrasis elementas

Skaičiaus *M* nustatymo prietaisai. Machometrai sudaromi pagal analogiškas elektrines ir kinetines schemas kaip ir tikrojo orinio greičio matavimo prietaisai, tik neįvertinant temperatūros *T*. Siekdami nustatyti skaičiaus *M* ir TOG matuoklių skirtumus, panagrinėsime skaičiaus *M* matuoklio principą, išreikštą apytikre formule, neįvertinančia aplinkos spūdumo.

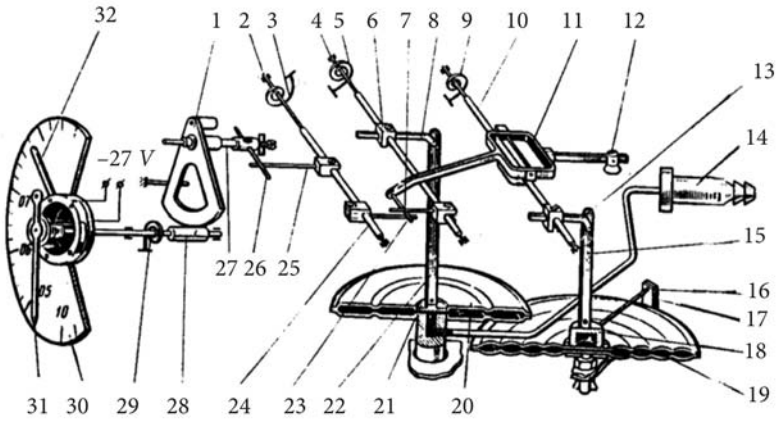
Atsižvelgiant į tai, kad $\rho = P/\left(R_s T\right)$, o nespūdžiosios aplinkos $P_{din} = \rho V^2/2$, galima užrašyti, kad $V = \sqrt{2R_s T} \cdot \left(P_{din.}^{0,5}/P^{0,5}\right)$.

Padalijus abi šios išraiškos puses iš garso greičio:

$$a = \sqrt{kR_s T} - M = \sqrt{\frac{2}{k} \cdot \frac{P_{din}}{P}}\,. \qquad (1.1.52)$$

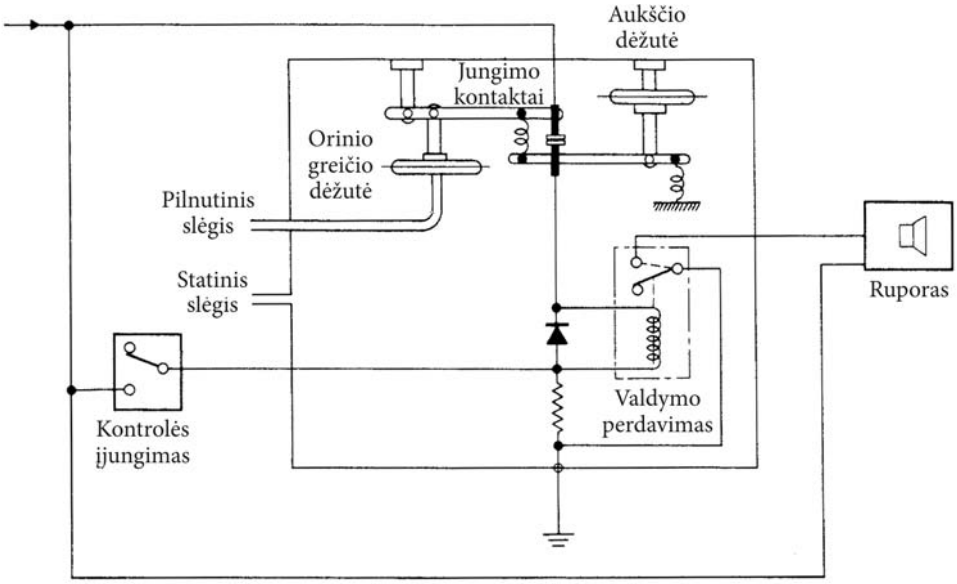
Palyginus (1.1.48) ir (1.1.52) priklausomybes, akivaizdu, jog tam, kad skaičiaus *M* indikatorius veiktų pagal 1.1.66 pav. pateiktas schemas, reikia: pakeisti aneroidinės dėžutės jautrumo charakteristiką, kad ji taptų proporcinga ne dydžiui $p^{0,4}$, o dydžiui $p^{0,5}$; schemoje 1.1.68 pav. neturi būti termistoriaus R_T.

Skaičiaus *M* indikatoriaus su signalizacija kinetinė schema pateikta 1.1.71 pav.



1.1.71 pav. Skaičiaus *M* indikatoriaus su signalizacija kinetinė schema

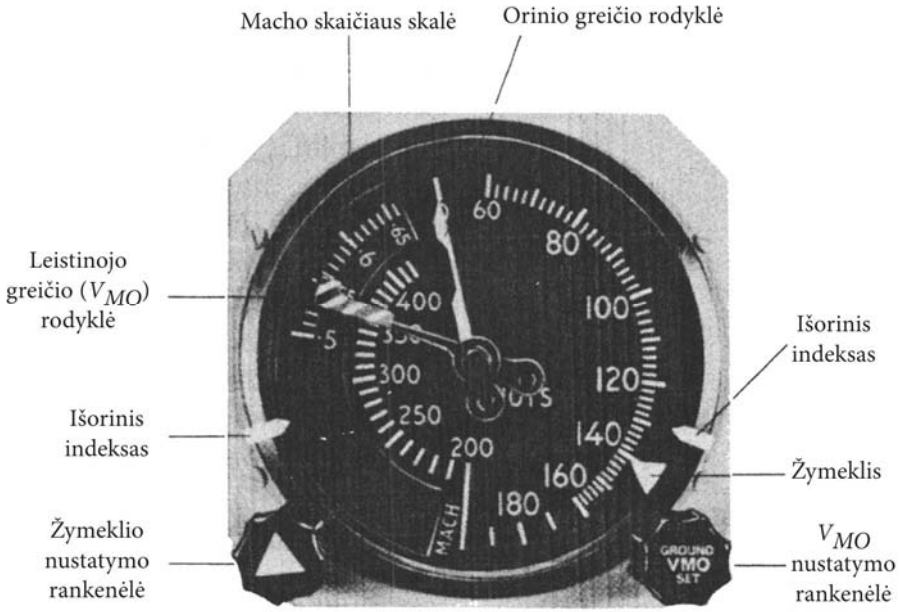
Indikatorius skirtas vizualiai nustatyti skaičių *M* nuo 0,5 *M* iki 1,0 *M*. Be to, prietaisas generuoja elektrinį signalą, kai iki 18 km aukštyje skaičius *M* pasiekia nustatytą ribą (1.1.72 pav.).



1.1.72 pav. Machometro signalizacijos schema

Bimetalinė apkaba *16* kompensuoja temperatūros pokyčių sukeliamas matavimo paklaidas. Apkabos išlinkimas perduodamas aneroidinės dėžutės standžiajam centrui *18* dviem adatomis *17*. Tam tikras skaičiaus *M* ribinis dydis, kuriam esant signalinis įtaisas sujungia elektrinę grandinę ir generuoja įspėjamąjį signalą, nustatomas reguliuojant prietaisą signaline rodykle *32*.

Dažnai machometrai ir tikrojo orinio greičio matavimo prietaisai realizuojami kartu. Tokie greičio matuokliai rodo tikrąjį orinį greitį bei didžiausią jo leistinąją reikšmę V_{MO} rodyklėmis apvalioje skalėje (maždaug nuo 110 iki 900 km/val. keleiviniuose orlaiviuose), ir atskiroje skalėje kita rodykle Macho skaičių (nuo 0,400 iki 0,999) bei pasirinktąjį TOG greitį indeksu (1.1.73 pav.).



1.1.73 pav. Machometro ir tikrojo orinio greičio indikatorius

Tikrojo orinio greičio matavimo prietaisuose, kai temperatūra vertinama netiesiogiai, ***metodinė paklaida*** atsiranda dėl realių ir standartinių sąlygų neatitikimo. Tokia paklaida kompensuojama, matuojant temperatūrą T skrydžio aukštyje. TOG ir skaičiaus M matuoklių vadinamosios prietaiso paklaidos analogiškos aukštimačių paklaidoms. Iš dalies jos kompensuojamos priešingai jungiant aerodinamines dėžutes.

1.1.7. Vertikaliojo greičio indikatorius

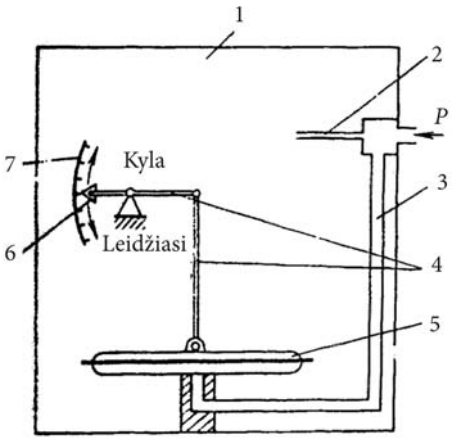
Vertikaliojo greičio V_v matavimo metodai:

– tikrojo orinio greičio $\vec{V}$ vertikaliojo dėmens matavimas;

– aukščio daviklio signalo diferencijavimas;

– pneumomechaninis, nuo skrydžio aukščio priklausančio statinio slėgio diferencijavimas.

Statinio slėgio P pneumomechaninio diferencijavimo metodas taikomas variometre. Jis pagrįstas tuo, kad matuojamas statinio atmosferos slėgio ir slėgio prietaiso korpuse *1*, besisiejančiame su atmosfera per kapiliarą *2,* skirtumas g_k (1.1.74 pav.).



1.1.74 pav. Variometro veikimo principas: 1 – korpusas; 2 – kapiliaras; 3 – pneumolaidis; 4 – PDM; 5 – manometrinė dėžutė; 6 – rodyklė; 7 – skalė

Kai skrydis ***horizontalusis***, šis skirtumas lygus nuliui. Kintant aukščiui, slėgis P pneumolaide *3* ir aneroidinės dėžutės *5* viduje keičiasi iš karto, o korpuse *1* dėl oro srauto pasipriešinimo kapiliare slėgis P_k nusistovi pavėluotai. Kai vertikalusis greitis pastovus, V_v = const, kiekvieną jo reikšmę atitinka slėgių skirtumas $g_k = P - P_k$. Į slėgio skirtumą reaguojančio manometro JE *5* deformacijos veikia rodyklę *6* – pasuka ją skalės *7* atžvilgiu.

Išvedant variometro ***gradavimo*** formulę, oro srautas kapiliare laikomas laminariniu. Slėgio kitimo greitis išreiškiamas taip:

$$\frac{dP_k}{dt} = \frac{\pi d_{kap}^4}{128 V_k l_{kap} \eta_0} \frac{T_k}{T_{kap}} P_{kap} \left(P - P_k \right), \tag{1.1.53}$$

čia P_k, T_k ir v_k – slėgis, oro temperatūra ir prietaiso korpuso vidinis tūris; d_{kap}, l_{kap}, P_{kap}, T_{kap} – kapiliaro skersmuo, ilgis, slėgis ir oro temperatūra jame; η_0 – oro klampumas.

(1.1.53) išraišką galima užrašyti taip:

$$\tau_v \frac{dP_k}{dt} + P_k = P, \tag{1.1.54}$$

čia $\tau_v = \frac{128 V_k l_{kap} \eta_0 T_{kap}}{\pi d_{kap}^4 P_{kap} T_k}$ – aukščio gradientas (minėtas anksčiau).

Įvertinus žinomą barometrinę slėgio kitimo priklausomybę standartinėje atmosferoje $\frac{dp}{p} = -\frac{g_0}{R_s T} dH$, (1.1.54) lygtį galima transformuoti:

$$\tau_v \frac{dg_k}{dt} + g_k = -S_v V_v, \tag{1.1.55}$$

čia $S_v = \frac{\tau_v p}{RT}$ – prietaiso jautrumas; $V_v = dH/dt$; R – molinė dujų pastovioji.

Iš (1.1.55) lygties gauname variometro perdavimo funkciją kaip rodmenų priklausomybę nuo slėgio:

$$W(p) = -\frac{S_v}{\tau_v p + 1}. \tag{1.1.56}$$

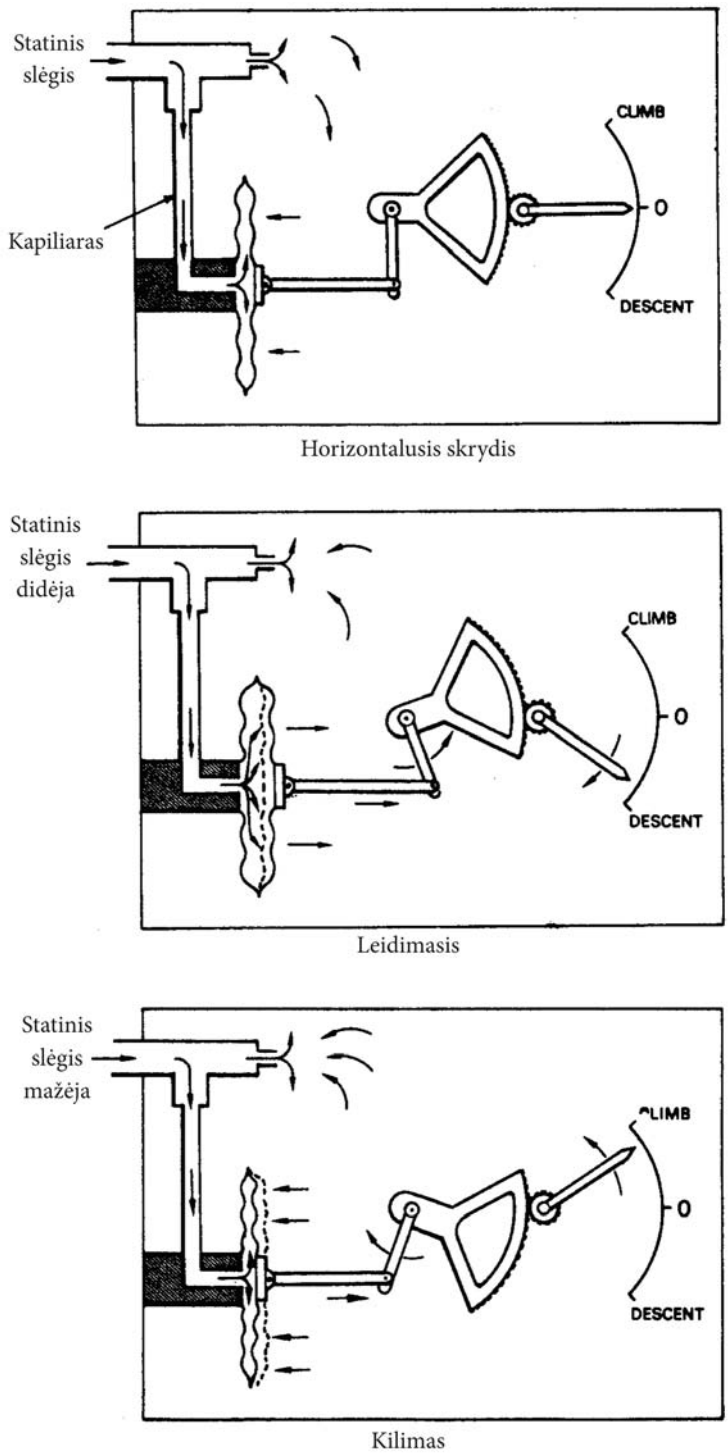
Nusistovėjus slėgio kitimui variometre, V_v = const, todėl $g_k = - S_v V_v$. Tarę, kad $P_{kap} \approx p$ ir įvertinę τ_v pagal (1.1.54) priklausomybę, gauname variometro ***gradavimo*** formulę:

$$g_k = -128 \frac{\eta_0 l_{kap} V_k T_{kap}}{\pi d_{kap}^4 R T_k t} V_v. \tag{1.1.57}$$

Minuso ženklas rodo, kad, esant $V_v > 0$, slėgių skirtumas yra $g_k < 0$. Graduojant prietaisą imama, kad $T_{kap} = T_k = T = T_0$ – standartinės atmosferos temperatūra.

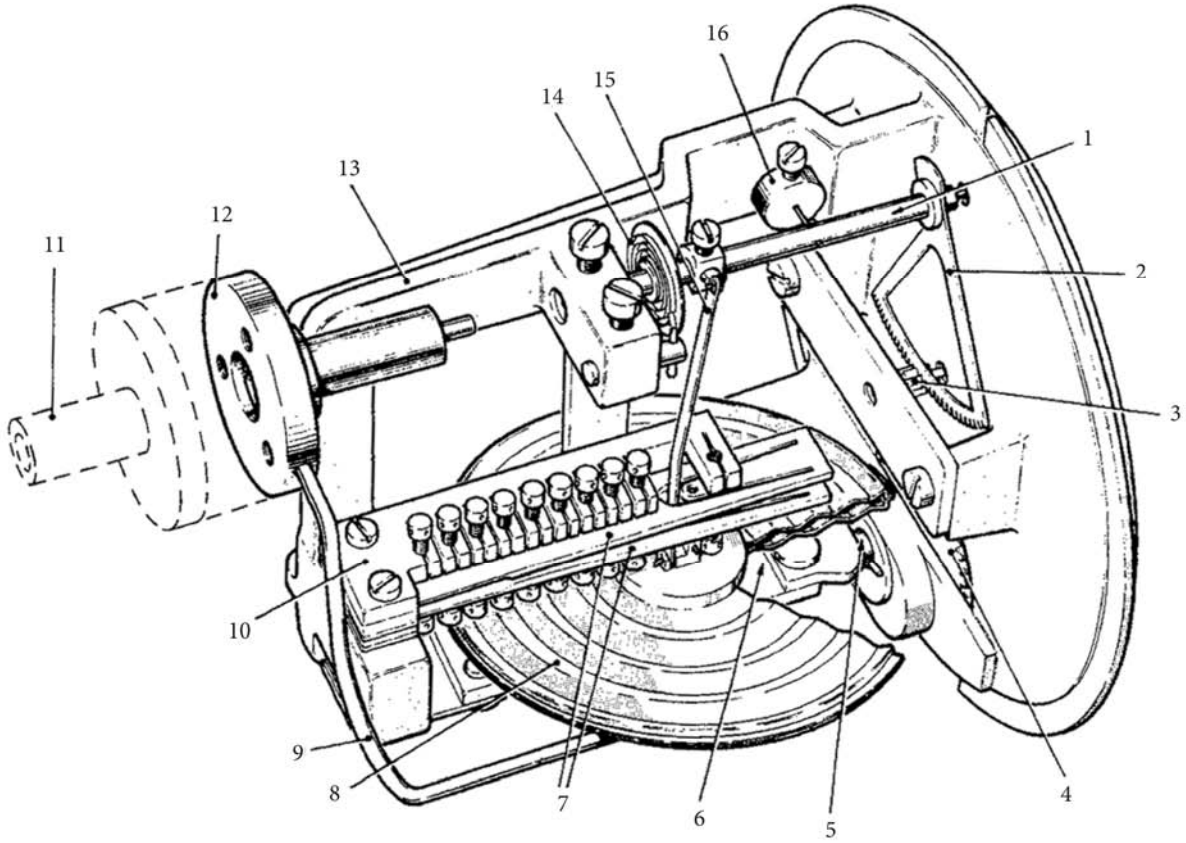
Jei variometro JE poslinkio priklausomybė matuojamojo slėgių skirtumo g_k atžvilgiu yra tiesinė ir PDM perdavimo santykis pastovus, – turime variometrą su ***tolygia*** rodmenų skale (1.1.75 pav.).

Tokio tipo variometrai skirti nedideliems vetikaliojo greičio V_v matavimo diapazonams (pavyzdžiui, $V_v = \pm 10$ m/s). Didesniems vertikaliojo greičio V_v kitimams matuoti prietaiso jautrumas (rodyklės polinkio kampas, kintant greičiui 1 m/s) turi būti sumažintas. Tačiau orlaivio pilotavimo patogumui, atliekant horizontalųjį skrydį, netikslinga mažinti prietaiso jautrumą ties nuline reikšme, nes pagal rodyklės nuokrypius nuo šios reikšmės sprendžiama apie horizontaliojo skrydžio nesklandumus.



1.1.75 pav. Vertikaliojo greičio indikatoriaus su tolygiąja skale veikimo principas

Todėl naudojami prietaisai su ***netolygiąja*** skale, kurios padalos mažėja simetriškai nuo skalės pradžios jos galų link. Netolygi skalė gaunama naudojant prietaiso PDM kulisinį mechanizmą, keičiantį PDM perdavimo santykį. 1.1.76 pav. pateiktoje variometro schemoje kulisinis mechanizmas *15* (pavadėlis su smeige ir kulise) yra tarp rodyklės *11* ir tribo *2*. Kai skrydis horizontalus, pavadėlio smeigė yra vidurinėje kulisės dalyje. Orlaiviui kylant ar leidžiantis, smeigė slysta išilgai kulisės, ir keičiasi atstumas tarp rodyklės ašies ir smeigės. Todėl tolygiai mažėja PDM perdavimo santykis ir padalos dydis. Ekscentrikas 5 skirtas rodyklei nustatyti ties skalės nuliu. 1.1.76 pav. pateikta kinetinė prietaiso schema būdinga variometrams, kurių greičio matavimo diapazonai – $V_v = \pm 30$ m/s, arba – $V_v = \pm 75$ m/s.



1.1.76 pav. Variometro su kulisiniu rodyklės ir tribo junginiu mechanizmas: 1 – rodyklės ašies pavaros mazgas; 2 – sektorius; 3 – velenas su tribu; 4 – krumpliaratis; 5 – ekscentriko pavaros mazgas; 6 – aneroidinės dėžutės tvirtinimo mazgas; 7 – kalibravimo spyruoklės; 8 – aneroidinė dėžutė; 9 – kapiliaro vamzdelis; 10 – kalibravimo blokas; 11 – statinio slėgio jungtis; 12 – orinio slėgio daviklio mazgas; 13 – korpuso dalis; 14 – balasavimo spyruolė; 15 – kulisinis mechanizmas; 16 – balansavimo pasvaras

Didelio matavimo diapazono, pavyzdžiui, V_v = ±300 m/s variometruos skalė susideda iš kelių dalių: tolygiosios (greičių diapazono ±30 m/s) ir tolygiai mažėjančios (kitos diapazono dalies).

Variometro orinio slėgio daviklių konstrukcijų variantai pateikti 1.1.77 pav. Čia parodyti du statinio slėgio tiekimo į matavimo elementą būdai: naudojant kapiliaro ir tūtos sistemą bei keramikinį jos analogą.

Metodinėms greičio V_v matavimo prietaisų paklaidoms priskiriamos temperatūrinės paklaidos atsiranda dėl temperatūrų T_{kap}, T_k ir T skirtumų atmosferoje bei temperatūros T_k nepastovumo prietaiso korpuse, esančiame nehermetinėje orlaivio kabinoje. Prie metodinių paklaidų taip pat skiriamos slėgio kitimo korpuso viduje vėlavimo paklaidos.

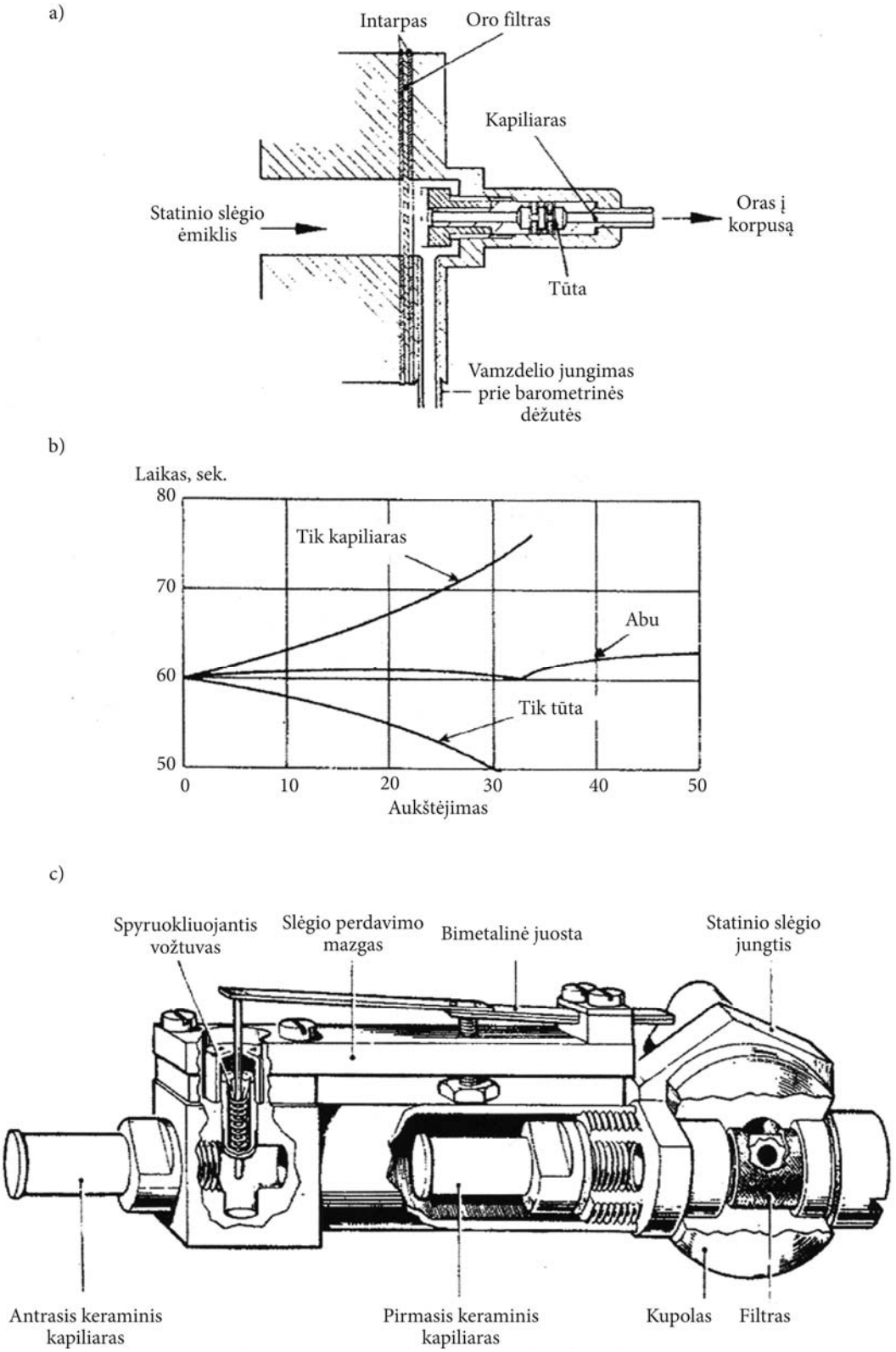
Absoliučioji temperatūrinė paklaida Δg_k dėl temperatūrų T_{kap}, T_k ir T skirtumo išreiškiama:

$$\Delta g_k = g_k^{/}\left[\frac{T_{kap}^2}{T_k T} - 1\right], \tag{1.1.58}$$

čia $g_k^{/}$ – matuojamojo slėgio skirtumo gradacinė reikšmė.

Ši paklaida nyksta mažėjant greičiui V_v, kai skrydis horizontalusis, Δg_k = 0. Paklaida gali būti sumažinta, naudojant temperatūrinius kompensatorius, keičiančius PDM perdavimo santykį arba kapiliaro charakteristikas.

Paklaida dėl temperatūros T_k nepastovumo aiškintina tuo, kad, kintant temperatūrai T_k, oras, įtekėdamas arba ištekėdamas pro kapiliarą, sukelia slėgio kritimą. Tikrinant prietaisus, įvedama temperatūrinio oro klampumo koeficiento pokyčio pataisa.



1.1.77 pav. Variometro orinio slėgio daviklių konstrukcijos: a – kapiliaro ir tūtos mechanizmas; b – kapiliaro ir tūtos slėgio tiekimo charakteristikos; c – keramikinis statinio slėgio tiekimo mazgas

Paklaida dėl slėgio kitimo vėlavimo korpuso viduje aiškintina tuo, kad variometras esti kaip aperiodinė grandis, kurios laiko pastovioji τ_v nustatoma pagal (1.1.54) formulę. Sumažinti τ_v galima didinant parametrą d_{kap} ir mažinant parametrus l_{kap}, v_k. Tai daro įtaką matavimų jautrumui, nes pagal (1.1.57) išraišką darbinė g_k riba tokiu atveju mažėja. Todėl kiek įmanoma didinamas slėgmačio membraninės dėžutės jautrumas.

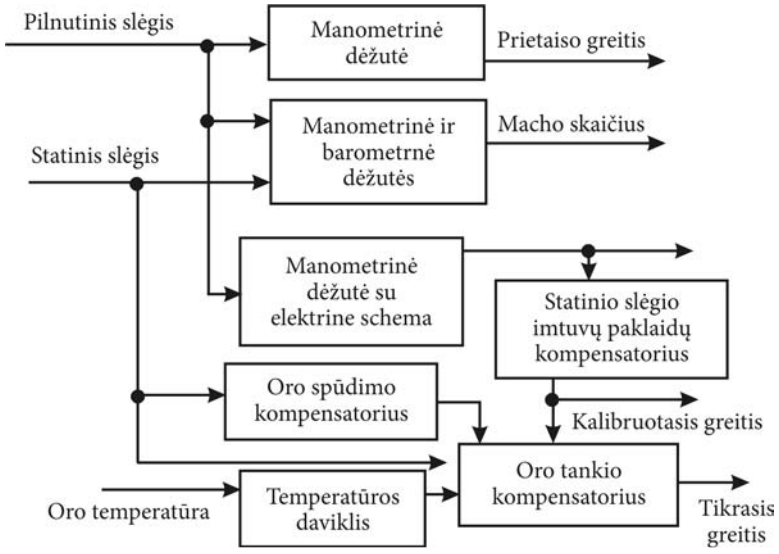
Variometrų vadinamosios ***prietaiso*** paklaidos analogiškos aukščiamačių paklaidoms.

1.1.8. Oro duomenų kompiuteris

Orlaivio aerometriniai prietaisai, naudojami greičiui ir aukščiui nustatyti realiojo laiko masteliu, neišvengia matavimų metodinių paklaidų, kurių atsiradimą lemia pats matavimo būdas, pagrįstas standartinės atmosferos modelio panaudojimu. Šis modelis tik apytikriai atspindi minėtiesiems matavimams naudojamus realiosios atmosferos parametrus. Reikia skirti metodines matavimo paklaidas, atsirandančias dėl atmosferos parametrų neatitikimo standartui bei paklaidas dėl pasikeitusio vietos reljefo ir oro sąlygų skrydžio metu. Paklaidos dėl atmosferos parametrų neatitikimo standartui gali būti dalijamos į paklaidas dėl slėgio pokyčių prie Žemės paviršiaus ir temperatūros pokyčių standartinio temperatūros pasiskirstymo pagal aukštį.

Matuojant orlaivio prietaiso orinį greitį pagal dinaminio slėgio dydį, tariama, kad pasipriešinančiojo orlaiviui oro tankis yra pastovus ir lygus tankiui ρ_0 normaliosiomis standartinėmis sąlygomis, nors aišku, kad skirtinguose skrydžio aukščiuose, matuojant šį greitį, oro tankis kinta. Norint išvengti arba bent sumažinti esamas oro duomenų prietaisų paklaidas, taikomos matavimų korekcijos, įvedant į matavimo kanalus statinio slėgio, temperatūros, oro tankio ir kitas pataisas, naudojant tam skaitmenines signalų apdorojimo priemones.

Tai atliekama bortiniu oro duomenų kompiuteriu pagal 1.1.78 pav. pateiktą algoritmą, siekiant eliminuoti aerometrinių prietaisų metodines paklaidas ir pasiekti tikslesnių matavimo rezultatų.



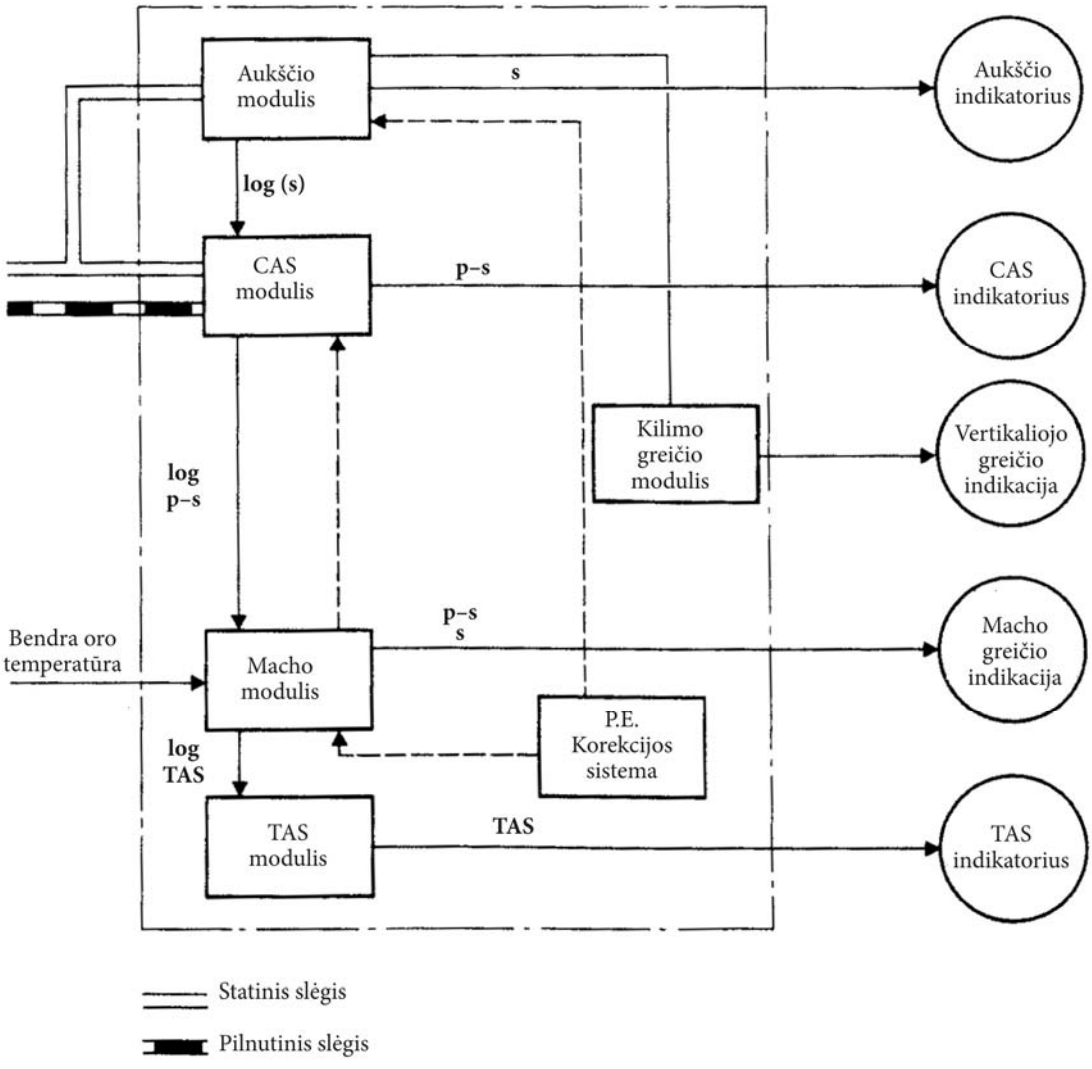
1.1.78 pav. Oro duomenų parametrų matavimu algoritmo blokinė schema

Apibendrinta oro duomenų kompiuterio struktūra pateikta 1.1.79 pav. Struktūrą sudaro:
– aukščio modulis;
– prietaiso orinio greičio (IAS) modulis;
– aukščio kitimo greičio modulis;
– Macho skaičiaus modulis;
– tikrojo orinio greičio (TAS) modulis;
– kalibruotojo orinio greičio (CAS) modulis;
– korekcijų modulis.

Visi moduliai per duomenų perdavimo magistralę jungiasi tarpusavyje bei su matavimų atvaizdavimo (indikatorių) moduliu ir su korekcijos formavimo moduliais. Sistemą ir duomenų srautus valdo centrinis procesorius, prijungtas prie modulių per duomenų magistralę.

Aukščio modulis skirtas orlaivio aukščiui nustatyti, įvertinant temperatūros ir slėgio pokyčių pataisas dėl reljefo ir realiosios atmosferos įtakos, pagal gaunamą informaciją iš korekcijų formavimo modulio. Šis modulis sujungtas su orlaivio statinio slėgio linija P_{st} ir jungia savyje statinio slėgio keitiklius į elektrinį signalą, keitiklį analogas-kodas ir duomenų registrus, valdomus per duomenų magistralę iš centrinio procesoriaus. Be to, per duomenų magistralę aukščio modulis sujungtas su indikatorinio greičio moduliu ir aukščio kitimo greičio moduliu bei procesoriumi.

Prietaiso greičio modulis skirtas indikatorinio orlaivio greičiui (IAS) nustatyti, įvertinant matavimų pataisas. Modulis, sujungtas su orlaivio statinio P_{st} ir pilnutinio P_p slėgio linijomis, turi savyje atitinkamus slėgio keitiklius į elektrinį signalą, keitiklius analogas-kodas ir duomenų kaupimo registrus. Be to, modulis per duomenų magistralę sujungtas su Macho skaičiaus nustatymo moduliu ir procesoriumi.



1.1.79 pav. Oro duomenų kompiuterio apibendrinta struktūrinė schema

Macho skaičiaus nustatymo modulis skirtas Macho skaičiaus reikšmei nustatyti. Jis sujungtas su orlaivio sustabdyto oro temperatūros matavimo įtaisu. Be to, šis modulis per duomenų perdavimo magistralę sujungtas su prietaiso greičio, tikrojo orinio greičio ir duomenų korekcijos moduliais bei procesoriumi.

Aukščio kitimo greičio modulis skirtas orlaivio vertikaliajam greičiui apskaičiuoti pagal iš aukščio nustatymo modulio gautus sukoreguotus duomenis. Per duomenų magistralę modulis sujungtas su procesoriumi, aukščio moduliu ir indikacijos moduliais.

Tikrojo orinio greičio modulio paskirtis – pagal iš kitų blokų gautus sukoreguotus duomenis nustatyti tikrąjį orinį orlaivio greitį. Todėl jis sujungtas su duomenų magistrale ir indikacijos bloku.

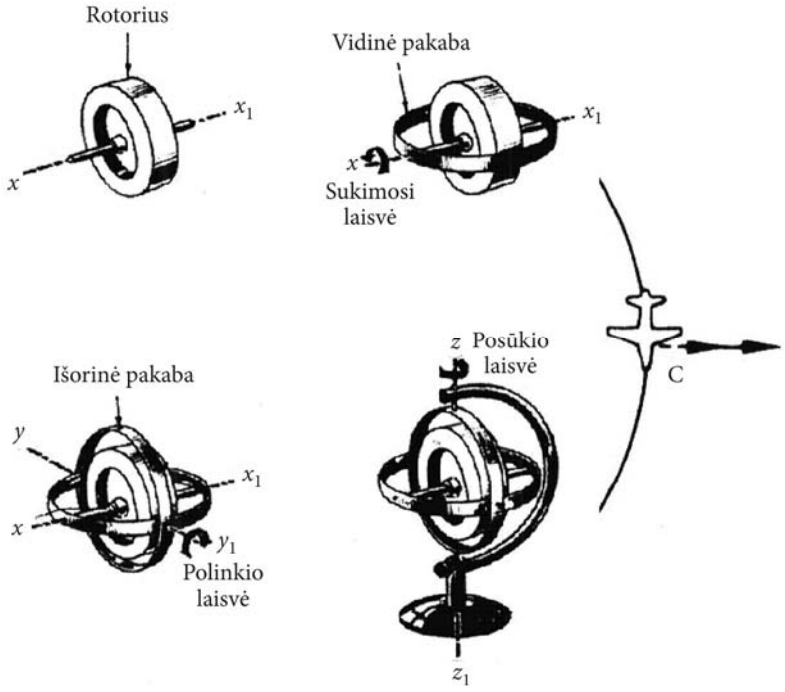
Centrinis procesorius skirtas visai sistemai valdyti, perduodamiems duomenims tarp modulių sinchronizuoti, metodinių matavimų paklaidų pataisoms apskaičiuoti pagal iš žinomų korekcinių priklausomybių gaunamus specializuotos programinės įrangos algoritmus. Sistema sudaro sąlygas įvesti į matavimų kanalus reikiamas korekcijas koeficientų arba matematinių priklausomybių pavidalu, lanksčiai keisti jos konfigūraciją: matavimų ir paklaidų korekcijų modulių skaičių bei valdymo programinę įrangą.

Oro duomenų kompiuteris per skaitmenines ir analogines duomenų perdavimo magistrales siunčia pirminius oro duomenų parametrus ir atliekamų matavimų rezultatus kitoms orlaivio sistemoms.

1.2. Giroskopiniai prietaisai

1.2.1. Giroskopiniai matavimų principai

Daugelio orlaivių skrydžių navigacijai naudojamų aviacinių prietaisų pagrindinis elementas yra giroskopas. Žodis ***giroskopas*** kilęs iš gr. ***giros*** – sukimasis, ***skopein*** – stebėti. Technikoje giroskopu vadinamas greitai besisukantis specialioje pakaboje įtvirtintas simetriškas kūnas (rotorius) (1.2.1 pav.), turintis tris laisvės laipsnius: ***sukimosi laisvę*** ašies XX_1, praeinančios pro rotoriaus centrą, atžvilgiu; ***polinkio laisvę*** ašies YY_1, statmenos rotoriaus centrui, atžvilgiu; ***posūkio laisvę*** ašies ZZ_1, statmenos sukimosi ir polinkio ašims, atžvilgiu.



1.2.1 pav. Giroskopo sandara ir laisvės laipsniai

Giroskopiniuose aviaciniuose prietaisuose paprastai naudojami dviejų ir trijų laipsnių giroskopai su kardanine pakaba.

Trijų laipsnių giroskopas (1.2.1 pav.) yra sudarytas iš rotoriaus vidinio ir išorinio rėmų. Giroskopo rotorius sukasi atramose aplink ašį XX_1, vidinis rėmas kartu su rotoriumi gali pasisukti aplink ašį YY_1, išorinis rėmas turi galimybę laisvai judėti aplink ašį ZZ_1 nejudamojo pagrindo atžvilgiu.

Taigi giroskopo rotorius turi ***tris laisvės laipsnius***, kadangi gali suktis aplink tris koordinačių sistemos *X, Y* ir *Z* ašis, susikertančias taške *O*. Toks giroskopas vadinamas trijų laipsnių giroskopu.

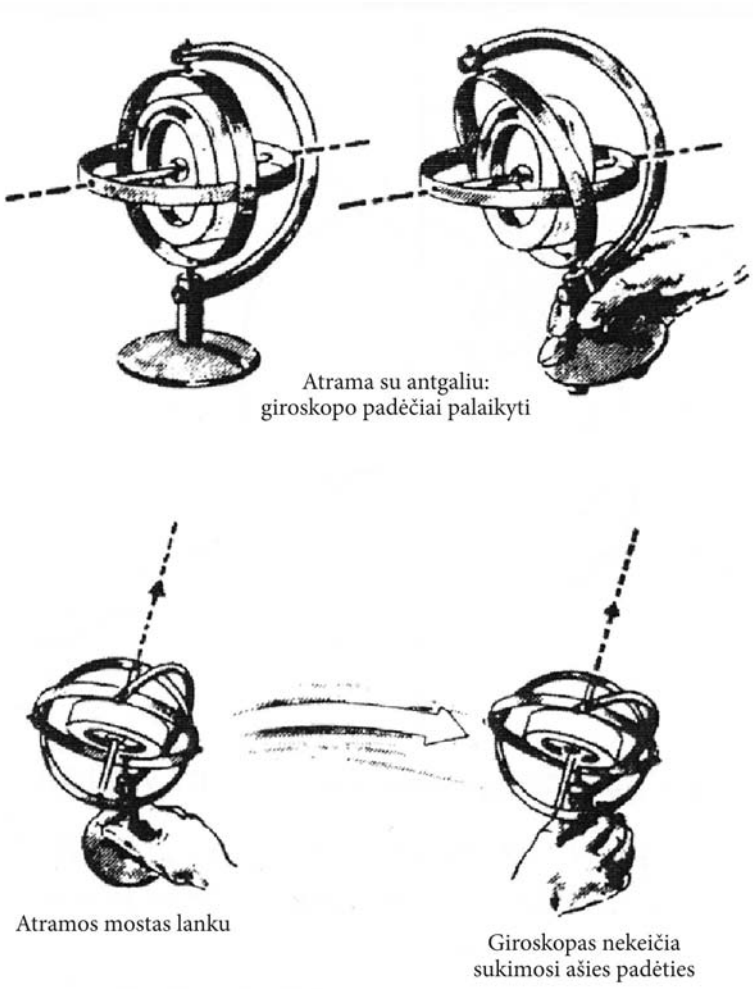
Kai giroskopo svorio centras sutampa su tašku *O*, jis vadinamas astatiniu. Giroskopas su greitai besisukančiu rotoriumi pasižymi daugeliu savybių, lemiančių platų jo pritaikymą aviaciniuose prietaisuose.

Panagrinėsime vizualiai pasireiškiančias ***giroskopo savybes*** laboratorinio eksperimento metu (1.2.2 pav.). Nukreipsime greitai besisukančio giroskopo rotoriaus ašį į nustatytą tašką erdvėje. Atlikdami pagrindo svyravimo judesius įvairiose plokštumose, pastebėsime, kad giroskopo rotoriaus ašis išlaiko nustatytą jai kryptį.

Suduodami per kurį nors rėmą plaktuku su gumine tarpine, pastebėsime sunkiai nustatomus ir greitai išnykstančius ašies ***virpesius***. Rotoriaus padėtis beveik nekinta.

Spausdami vidinį rėmą (sudarydami išorinių jėgų momentą ašies XX_1 atžvilgiu) pastebėsime, kad giroskopas pasisuka aplink išorinio rėmo ašį YY_1, o vidinis rėmas lieka nepajudėjęs. Taigi giroskopas pasisuka ne pagal veikiančios išorinės jėgos kryptį, bet plokštumoje, statmenoje tai jėgos krypčiai. Toks giroskopo judesys vadinamas ***precesiniu*** judesiu*.

Reiškinys, kada greitai besisukantis kūnas priešinasi bandymams pakeisti jo padėtį erdvėje, vadinamas giroskopiniu efektu.



1.2.2 pav. Giroskopo savybių reiškimasis

Pagrindinė trijų laipsnių giroskopo savybė yra gebėjimas išlaikyti nepakitusią rotoriaus ašies padėtį pasaulinėje erdvėje, nejautrumas stumtelėjimams ir smūgiams, gebėjimas atlikti precesinius judesius.

Kad būtų galima paaiškinti giroskopinio efekto (precesijos ir giroskopinio momento) esmę, nagrinėsime trijų laipsnių giroskopą, sąlygiškai išlaisvintą iš kardaninės pakabos (1.2.3 pav.).

*Precesija (lot. ***praecessio*** – ėjimas priekyje) – kietojo kūno sukimosi ašies judėjimas, kurio metu ašis brėžia erdvėje apskritą kūginį paviršių.

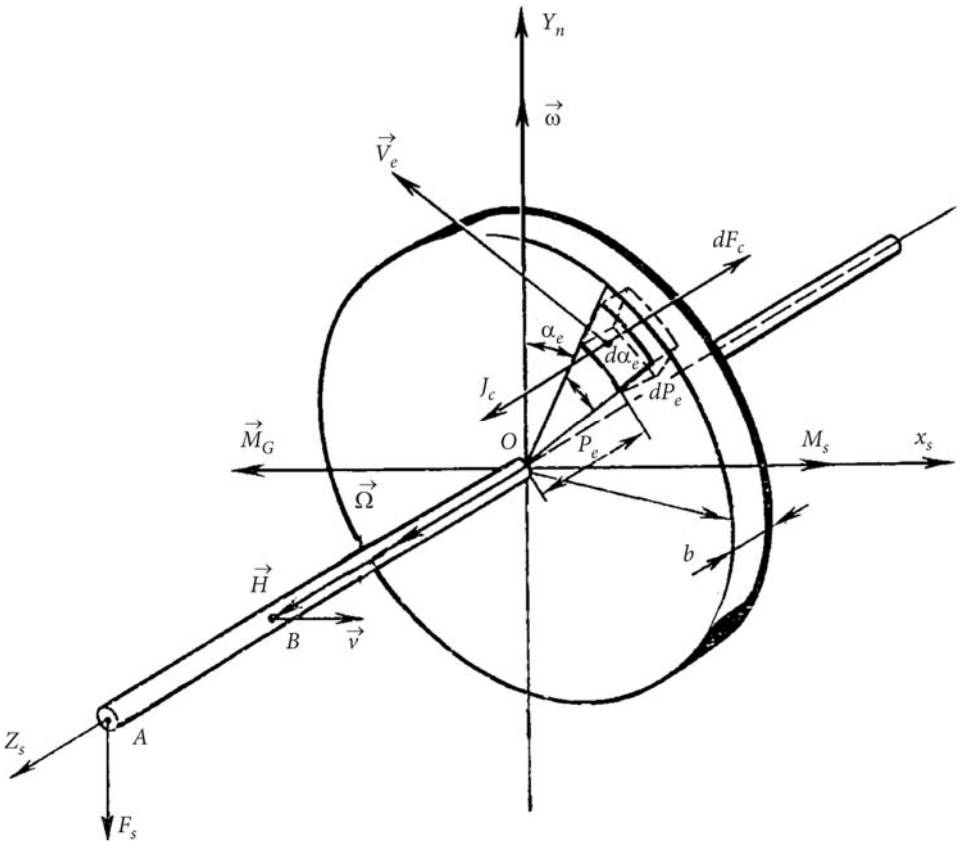
Pradžioje tarsime, kad giroskopas nesisuka. Taške *A* veikia išorinė jėga $\vec{F}_S$. Veikiant jėgai, giroskopas pradės suktis aplink horizontaliąją ašį OX_S.

Visai kitas jėgos $\vec{F}_S$ veikimo rezultatas bus, jei giroskopo rotoriui prieš tai suteiksime didelį kampinį greitį Ω. Šiuo atveju giroskopo rotorius turės didelį kinetinį momentą:

$$\vec{H} = J\Omega,$$

čia *J* – rotoriaus inercijos momentas ašies OZ_S atžvilgiu.

Pažymėsime kinetinio momento vektoriaus $\vec{H}$ galą raide *B*. Pagrindinis išorinės jėgos $\vec{F}_S$ momentas $\vec{M}_S$, veikiantis giroskopą, sutampa su ašies OX_S kryptimi. Pagal Rezalio teoremą kinetinio momento $\vec{H}$ vektoriaus galo greitis *V* (taško *B* greitis) geometriškai lygus pagrindiniam išorinės jėgos momentui $\vec{M}_S$. Vadinasi, greitis *V* yra nukreiptas lygiagrečiai su ašimi OX_S ir lygus dydžiui $\vec{M}_S$. Taigi, veikiant jėgai $\vec{F}_S$, besisukančiojo giroskopo judesys nesutampa su jėgos $\vec{F}_S$ veikimo kryptimi, kaip esant nejudamajam rotoriui, o eina statmenai jėgos $\vec{F}_S$ veikimo krypčiai, t. y. aplink ašį OY_N. Šis judesys ir yra precesinis giroskopo judesys.



1.2.3 pav. Giroskopo dinamikos paaiškinimo schema

Tai, kad veikiant momentui $\vec{M}_S$ giroskopas nesisuka aplink ašį OX_S, byloja, kad, be momento $\vec{M}_S$, giroskope veikia dar kitas priešingai nukreiptas momentas, lygus momentui $\vec{M}_S$.

Panagrinėsime šio nežinomojo momento fizinę prasmę. Tam tikslui išskirsime rotoriaus kūne tūrinį elementą (1.2.3 pav.), kuris yra tiesėje, sudarančioje su ašimi OY_N kampą α_e, nuotoliu ρ_e nuo nejudamojo taško *O*. Išskirtojo elemento judesys gali būti išskaidytas į dvi komponentes: tiesinę, kurios greitis

$\vec{V}_l = \vec{\Omega} \cdot S_e$, ir kampinę komponentę, lemiamą išorinių jėgų momento $\vec{M}_S$, kurio greitis *w*. Taigi elementą veiks Koriolio pagreitis: $\vec{j}_s = 2\left(\vec{w} \cdot \vec{V}_s\right)$. Nagrinėjamą rotoriaus elementą veikiantis Koriolio pagreitis:

$$\vec{j}_s = 2\Omega \cdot w\rho_e \cos\alpha_e . \tag{1.2.1}$$

Sukelianti elementui nurodytą pagreitį elementarioji Koriolio jėga: $dF_s = -j_s dm_e$;

$$dF_s = -j_s dm_e . \tag{1.2.2}$$

Išreikšdami elementariąją masę dm_e per elementarųjį tūrį ir medžiagos tankį ρ, gausime: $dm_e = \rho \cdot b \cdot d\rho_e \cdot \rho_e d\alpha_e$, čia *b* – elemento plotis.

Elementarusis Koriolio jėgos dF_s momentas dR_s ašies OX_S atžvilgiu:

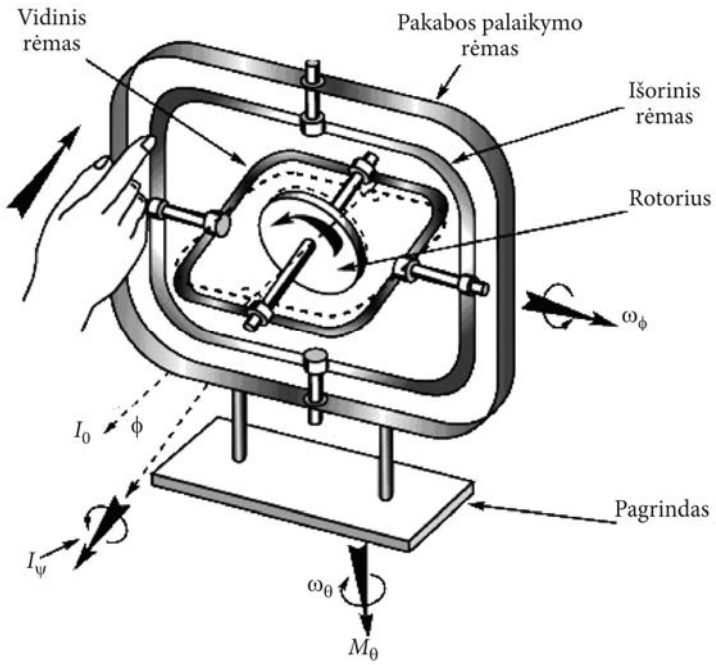
$$dR_s = \rho_e dF_s \cdot \cos\alpha_e = -2\rho\rho_e^3 b\Omega\cos^2\alpha_e d\rho_e d\alpha_e . \tag{1.2.3}$$

Atlikę (1.2.3) funkcijos integravimą pagal tiesinę ir kampinę koordinates, gausime suminį Koriolio inercijos jėgų momentą, veikiantį giroskopo rotorių:

$$R_s = -Hw . \tag{1.2.4}$$

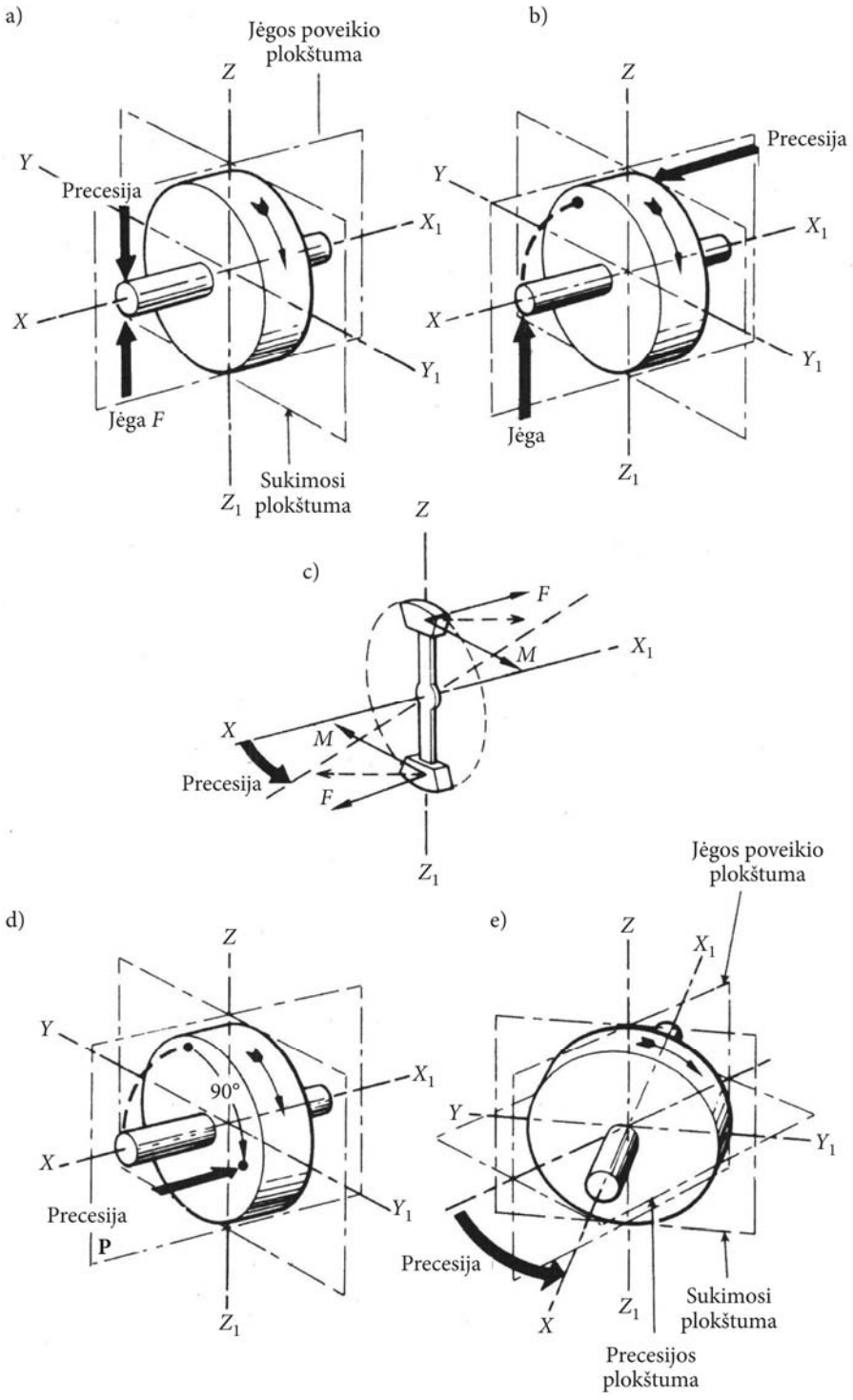
Pagrindinis Koriolio inercijos jėgų momentas $\vec{R}_s$ vadinamas giroskopiniu momentu ir žymimas $\vec{M}_g$. Giroskopinis momentas ir yra tas momentas, kuris subalansuojantis (atsveriantis) išorinės jėgos momentą $\vec{M}_S$ ir neleidžiantis giroskopui suktis aplink ašį OX_S. Giroskopinis momentas priešingas momentui $\vec{M}_g$ pagal kryptį ir lygus pagal dydį (1.2.3 pav.).

Kai giroskopų rėmų pakabas (1.2.4 pav.) veikia smūginiai momentai, tyrimai rodo, kad giroskopo sukimosi ašis įgauna kai kuriuos virpamuosius judesius, kurie yra aukštojo dažnio su pakankamai maža amplitude.

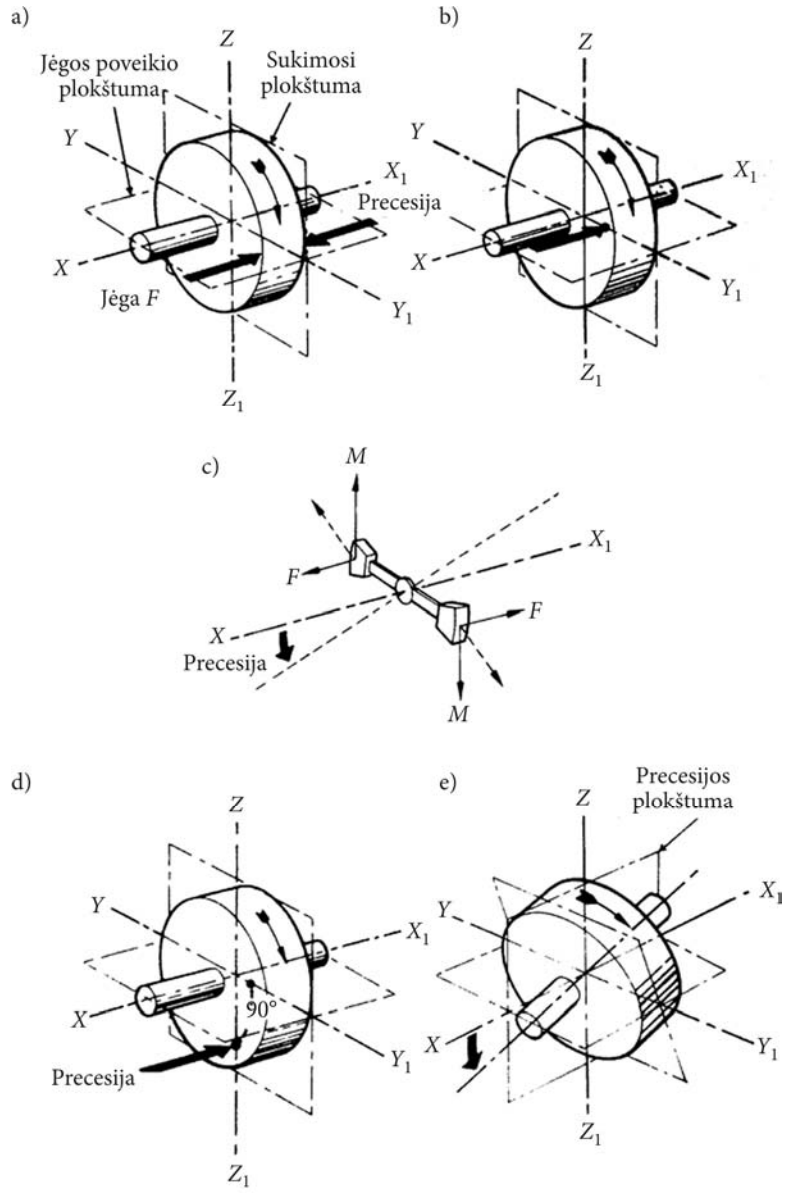


1.2.4 pav. Trijų laipsnių giroskopo su kardaninės pakabos dviem rėmais kinetinė schema: I_γ – rotoriaus sukimosi ašis, kuria nukreiptas jo kinetinis momentas; I_0 – kinetinio momento atraminė kryptis; *j* – kardaninės pakabos vidinio rėmo posūkio kampas; w_j – vidinio pakabos rėmo kapinis greitis (precesija); M_q – išorinės jėgos poveikio momentas; w_q – išorinio rėmo posūkio kampinis greitis (nutacija)

Labai aukštas šių virpesių (jie vadinami ***nutaciniais*** virpesiais) dažnis daro juos vos pastebimus. Dėl trinties kardaninės pakabos ašyse jie greitai nusilpsta. Todėl iš esmės giroskopui momentiniai smūgiai, atsirandantys dėl vibracijų, kratymų ir panašių poveikių, neturi įtakos. Giroskopas tokiu atveju išsaugo pastovią sukimosi ašies padėtį erdvėje. Bendruoju atveju, veikiant giroskopą pastoviuoju momentu M_{x_s}, jis atlieka sudėtingą judesį, susidedantį iš tolydžiojo išorinio rėmo sukimosi (precesijos) nustatytu kampiniu greičiu, esant nedideliu kampu pakeistai vidinio rėmo padėčiai ir mažiems greitiems nutaciniams jo ašies virpesiams, kurie greitai užgęsta. Vidinio rėmo poslinkį praktikoje galima laikyti lygų nuliui, todėl giroskopo judesys, veikiant pastoviajam momentui ir esant pakankamam tikslumui, lygus tolydžiajai precesijai, kurios kampinis greitis w_N. Giroskopo precesijos efektas vaizdžiai parodytas 1.2.5 pav. ir 1.2.6 pav.



1.2.5 pav. Giroskopo precesija: a – giroskopinė pasipriešinimo jėga; b – jėgos perdavimas; c – poveikis rotoriaus dalims; d – precesijos sukėlimas; e – precesijos poveikis

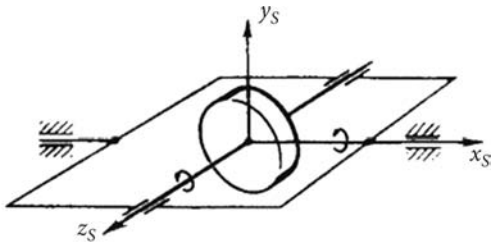


1.2.6 pav. Giroskopo precesija: a – giroskopinė pasipriešinimo jėga; b – jėgos perdavimas; c – poveikis rotoriaus dalims; d – precesijos sukėlimas; e – precesijos poveikis

Praktikoje dažnai tenka nustatinėti giroskopo sukimosi kryptis, veikiant išoriniams momentams išilgai jo pakabos ašių. Norint nustatyti šiais atvejais atsirandančią precesinio judesio kryptį, patogu naudoti ***„dešiniosios rankos trijų pirštų“*** taisyklę, kurios esmė tokia: jei dešiniosios rankos smilių nukreipsime išilgai kinetinio momento vektoriaus, o vidutinį – išilgai išorinių jėgų momento vektoriaus, tai didžiojo piršto kryptis rodys precesijos kampinio greičio vektoriaus kryptį.

Dviejų laipsnių giroskopas, skirtingai nuo trijų laipsnių giroskopo, sudarytas tik iš vieno rotoriaus pakabos rėmo (1.2.7 pav.), turi ***du laisvės laipsnius***: rotoriaus sukimąsi ašies OZ_S atžvilgiu ir rėmo sukimąsi ašies OX_S atžvilgiu.

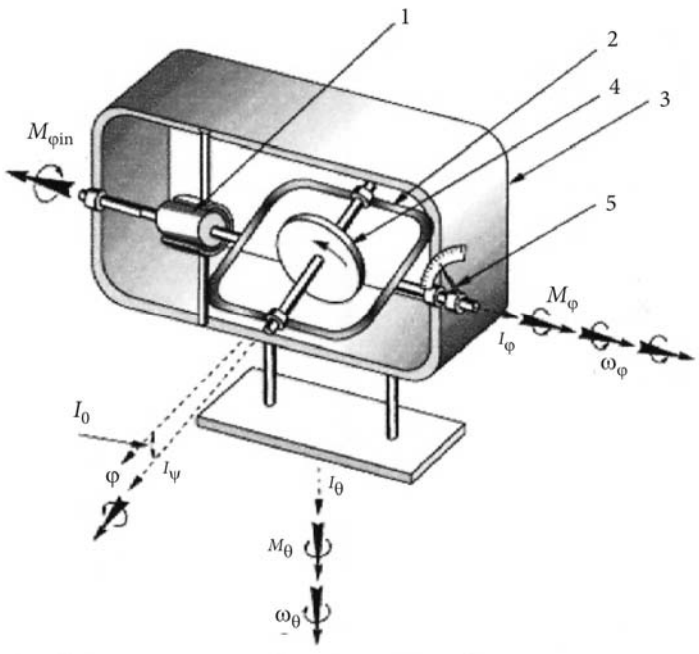
Tokio giroskopo dinamikos teorinis nagrinėjimas leidžia daryti išvadas, kad dviejų laipsnių giroskopas neturi atsparumo smūgiams bei pastoviems momentams, veikiantiems ašies OX_S atžvilgiu. Tačiau sukantis giroskopui ašies OX_S atžvilgiu greičiu β_g , atsiranda giroskopinis momentas ašies OY_S atžvilgiu, veikiantis ašies OX_S pakabos atramas, dėl kurių reakcijos šis momentas, veikiantis ašies OY_S sukimo kryptimi, subalansuojamas.



1.2.7 pav. Dviejų laipsnių giroskopo principinė schema

Tokiu atveju, jei dviejų laipsnių giroskopo pagrindas sukasi aplink ašį OY_S pastoviuoju kampiniu greičiu w, atsiranda giroskopinis momentas $M_g = Nw$, nukreiptas išilgai giroskopo ašies OX_S. Šiuo atveju giroskopas atlieka greitėjantį judesį pagrindinės ašies ir pagrindo sukimosi kampinio greičio vektoriaus sutapimo kryptimi.

Dviejų laisvės laipsnių giroskopo kinetinės schemos pavyzdys pateiktas 1.2.8 pav.

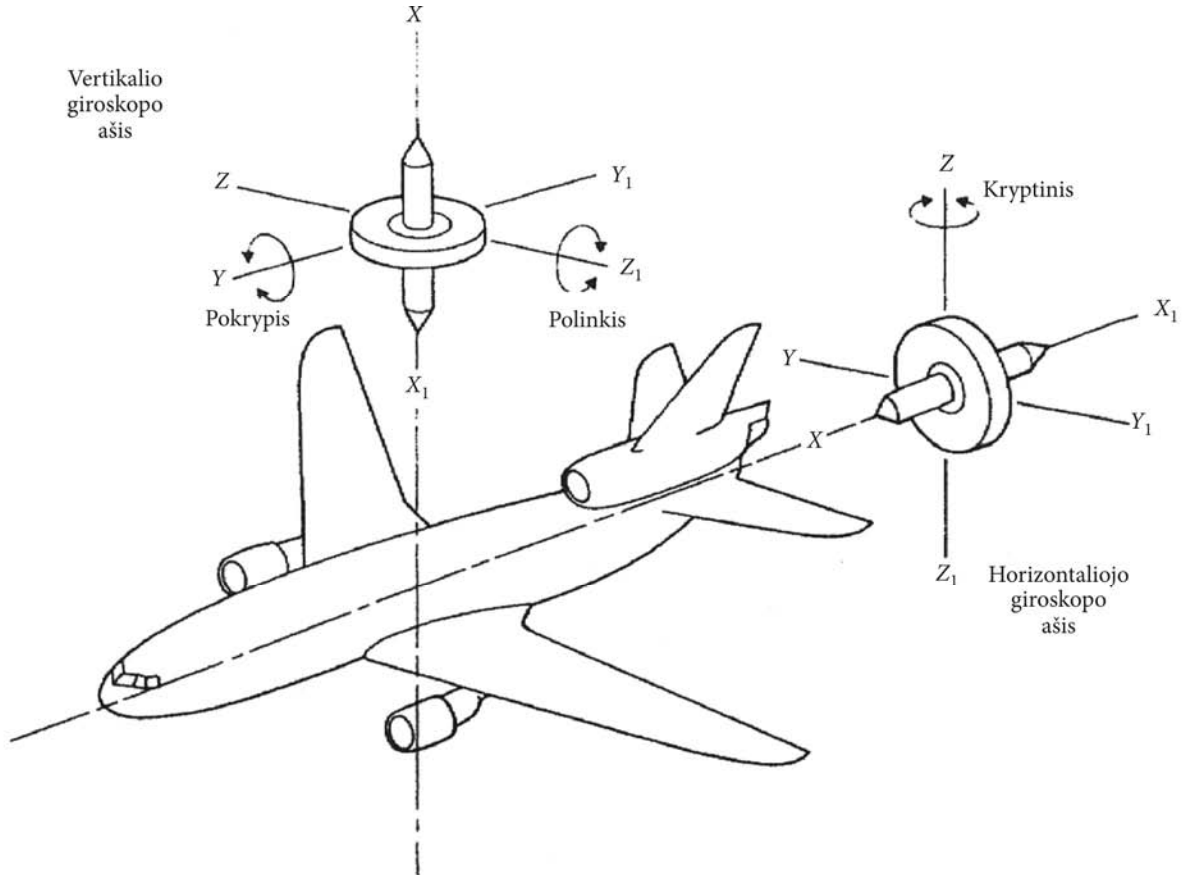


1.2.8 pav. Dviejų laipsnių giroskopo realizacijos kinetinė schema: 1 – slopintuvas (dempferis); 2 – rėmas; 3 – korpusas; 4 – rotorius; 5 – rėmo posūkio kampo rodiklis

Atraminių koordinačių sistemų sudarymas. Giroskopiniai prietaisai sudaro aviacinių prietaisų grupę, skirtą orlaivio evoliucijos erdvėje kampams bei kampiniams greičiams matuoti ir matavimų rodmenims pilotui patogia forma atvaizduoti. Kadangi orlaivio skrydžio valdymas neįmanomas be orlaivio kampinio judėjimo koordinačių jo masių centro atžvilgiu nustatymo, stebėjimo ir keitimo, pagrindinė tokių prietaisų paskirtis yra sudaryti ***orlaivio atraminę koordinačių sistemą***, kurios atžvilgiu būtų galima nustatyti orlaivio evoliucijos kampus.

Įvertinant laisvojo trijų laipsnių giroskopo savybę išlaikyti nepakitusią jo rotoriaus sukimosi ašies padėtį pasaulinėje erdvėje, nejautrumą stumtelėjimams ir smūgiams, gebėjimą atlikti precesinius judesius, jis gali būti sėkmingai naudojamas atraminėms koordinačių sistemoms sudaryti.

Orlaivio judesio kampų atskaitos atraminės koordinačių sistemos sudaromos dviem pagrindiniais būdais: orlaivio masių centre esantis giroskopas orientuojamas taip, kad pagrindinė jo ašis būtų išlaikoma vietos vertikalėje arba pasirinktoje horizontalės kryptyje, kaip parodyta 1.2.9 pav.



1.2.9 pav. Atraminės koordinačių sistemos sudarymas vertikaliuoju ir horizontaliuoju giroskopu

Pirmuoju atveju sudaromos galimybės matuoti atraminės koordinačių sistemos atžvilgiu orlaivio polinkio ir posvyrio kampus, antruoju – nustatyti orlaivio kryptį, krypavimo kampus ir kampinius greičius.

Kaip žinoma, trijų laipsnių giroskopo kinetinio momento kryptis nekinta pasaulinėje erdvėje, o ne Žemės atžvilgiu. Todėl dėl Žemės sukimosi apie savo ašį ir orlaivio judėjimo Žemės atžvilgiu vietos vertikalė nukryps nuo giroskopo kinetinio momento krypties. Dėl šios aplinkybės orlaivio judėjimo kampinių parametrų matavimas reikamu tikslumu gali tapti neįmanomas.

Laisvojo giroskopo apribojimai. Panagrinėsime šį reiškinį, atmesdami skrydžio aukštį lyginant su Žemės spinduliu.

Tegul orlaivis yra taške O_o (1.2.10 pav.) apibūdinamu vietos pločiu φ ir ilgiu λ. Pasirinkta atskaitos sistema $O_oX_oY_oZ_o$ išdėstyta taip, kad ašis O_oX_o nukreipta į Šiaurę, ašis O_oZ_o į Rytus, o ašis O_oY_o sutampa su vietos vertikale. Tegul orlaivis atlieka skrydį pastoviu kelio greičiu V_k horizontaliojoje plokštumoje ($\vartheta = \gamma = 0$) ir pasirinktu kursu ψ.

Šiuo atveju su orlaivio judėjimo trajektorija susietos ašys $OX_g\,Y_g\,Z_g$, užima taške O_o sukančiąją padėtį: ašis OY_g – sutampa su ašimi O_oY_o, ašis $\underline{OX_g}$ – nukreipta pagal krypties greičio vektorių $\vec{V}_k$, ašis OZ_g – statmena ašims OX_g ir OY_g. Pradiniu skrydžio momentu giroskopo ašys $OX_s\,Y_s\,Z_s$ sutampa su ašimis $OX_g\,Y_g\,Z_g$.

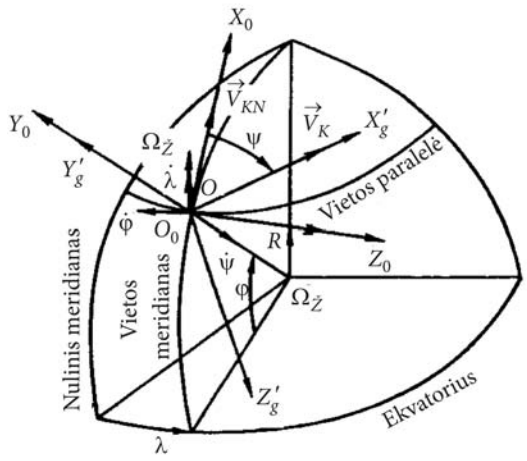
Išskaidysime kelio greitį V_k į šiaurinę V_{kN} ir rytinę V_{kE} komponentes:

$$V_{kN} = V_k \cos\psi;\; V_{kE} = V_k \sin\psi\,. \tag{1.2.5}$$

Tada, orlaiviui skrendant, kampinių geografinių koordinačių pakitimai bus:

$$\dot{\lambda} = \frac{V_{kE}}{R\cos\varphi} = \frac{V_k \sin\psi}{R\cos\varphi},\;\; \dot{\varphi} = \frac{V_{kN}}{R} = -\frac{V_k \cos\psi}{R} \tag{1.2.6}$$

čia R – Žemės spindulys.



1.2.10 pav. Orlaivio padėties nustatymas Žemės atžvilgiu

Tribriaunio $OX_gY_gZ_g$ erdvinio sukimosi kampinio greičio projekcijos šio tribriaunio ašyse bus:

$$\left.\begin{aligned} \omega_{Xg} &= -\dot{\varphi}\sin\varphi + \left(\Omega_{\check{Z}} + \dot{\lambda}\right)\cos\varphi\cdot\sin\psi, \\ \omega_{Yj} &= \left(\Omega_{\check{Z}} + \dot{\lambda}\right)\sin\varphi - \dot{\psi}, \\ \omega_{Zg} &= -\dot{\varphi}\cos\psi - \left(\Omega_{\check{Z}} + \dot{\lambda}\right)\cos\varphi\cdot\sin\psi, \end{aligned}\right\}, \tag{1.2.7}$$

čia $\Omega_{\check{Z}}$ – Žemės sukimosi kampinis greitis.

Įvertinę (1.2.6) ir (1.2.7), turėsime:

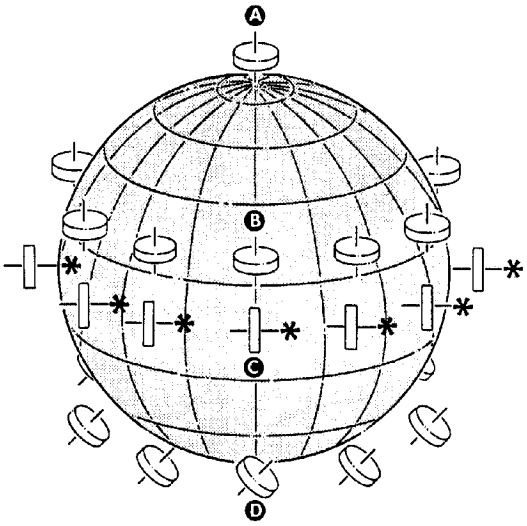
$$\left.\begin{aligned} \omega_{Xg} &= \Omega_{\check{Z}}\cos\varphi\cdot\cos\psi; \\ \omega_{Yg} &= \Omega_{\check{Z}}\sin\varphi + \frac{V_k\sin\psi}{R}\operatorname{tg}\varphi - \dot{\psi}; \\ \omega_{Zg} &= -\Omega_{\check{Z}}\cos\varphi\cdot\sin\psi - \frac{V_k}{R}. \end{aligned}\right\}. \tag{1.2.8}$$

Kampiniai greičiai ω_{Xg}, ω_{Yg}, ω_{Zg} apibūdina tribriaunio $OX_sY_sZ_s$, kuris juda kartu su orlaiviu ir išlaiko vertikaliąją ašį $O\,Y_g$, ir nejudančiojo pasaulinėje erdvėje tribriaunio $O\,X_gY_gZ_g$ ašių tarpusavio išsiderinimo greitį. Nuo kampinių greičių ω_{Xg} ir ω_{Zg} priklauso giroskopo kinetinio momento nuokrypio nuo vietos vertikalės greitis, atsirandantis dėl Žemės sukimosi per parą ir orlaivio judėjimo Žemės atžvilgiu (1.2.11 pav.).

1.2.11 pav. parodyti didžiausi laisvo idealiojo giroskopo ašies nuokrypiai per vieną Žemės apsisukimą aplink savo ašį (per parą) skirtingose vietovėse, pažymėtose A,B, C ir D.

Jei skrydis trunka valandą, kinetinio momento nuokrypio kampai nuo vertikalės gali siekti keletą laipsnių. Be to, giroskopas nukrypsta nuo pasirinktos padėties dėl trinties ir išsibalansavimo momentų pakabų ašyse. Todėl trijų laipsnių giroskopas gali būti naudojamas, kaip netrikdomas vietos vertikalės indikatorius, tik keletą minučių. Naudojant trijų laipsnių giroskopą vietos vertikalės indikatoriumi ilgesnį laiką, jį reikia sujungti su koreguojančiuoju įtaisu.

Be to, giroskopiniuose prietaisuose reikalingi koreguojančiųjų įtaisų išjungimo įrenginiai, kai orlaivis, atlikdamas posūkius, pasiekia nustatytą posūkio greitį ir dar daug kitokių įtaisų. Taigi aviaciniai giroskopiniai prietaisai sudaromi iš daugelio specifines funkcijas vykdančių elementų, vykdančių daugelį specifinių funkcijų.



1.2.11 pav. Žemės sukimosi įtaka giroskopo ašies nuokrypiui

Pagrindiniai giroskopinių prietaisų elementai – tai giroskopai, turintys rotorių, vidinį ir išorinį rėmus, giroskopo pagrindinės ašies sukimo pavarų elementai, ašies nuokrypių korekcijos ir jos valdymo įtaisai, rodmenų nuskaitymo ir atvaizdavimo elementai, inercijų slopintuvai ir prietaisų nustatymo į pirminę matavimų būseną įtaisai – aretyrai bei kiti elementai.

1.2.2. Giroskopinių prietaisų elementai

Aviaciniuose giroskopiniuose prietaisuose rotorius ir vidinis rėmas sujungiami į vieną konstrukcinį giroskopinį mazgą, vadinamą ***giromazgu***. Šis giromazgas sudarytas iš girokameros, kurioje yra giromotoras. Girokamera atlieka giroskopo vidinio rėmo funkcijas ir turi išorinę ašį, skirtą girokamerai pakabinti išorinio rėmo atramose.

Praktikoje naudojami du pagrindiniai giroskopinių aviacinių prietaisų rotorių sukimo pavaros realizavimo būdai: ***pneumatinis ir elektrinis***. Pirmuoju atveju giromotoras vadinamas pneumatiniu (arba vakuuminiu), antruoju – elektriniu. Pneumatiniai giromotorai dažniausiai naudojami lengvuose orlaiviuose esančiuose mažesnio tikslumo giroskopiniuose prietaisuose ir reikalauja mažiau energijos sąnaudų. Elektriniai giromotorai sunaudoja daugiau energijos, tačiau leidžia pasiekti didesnį prietaisų tikslumą.

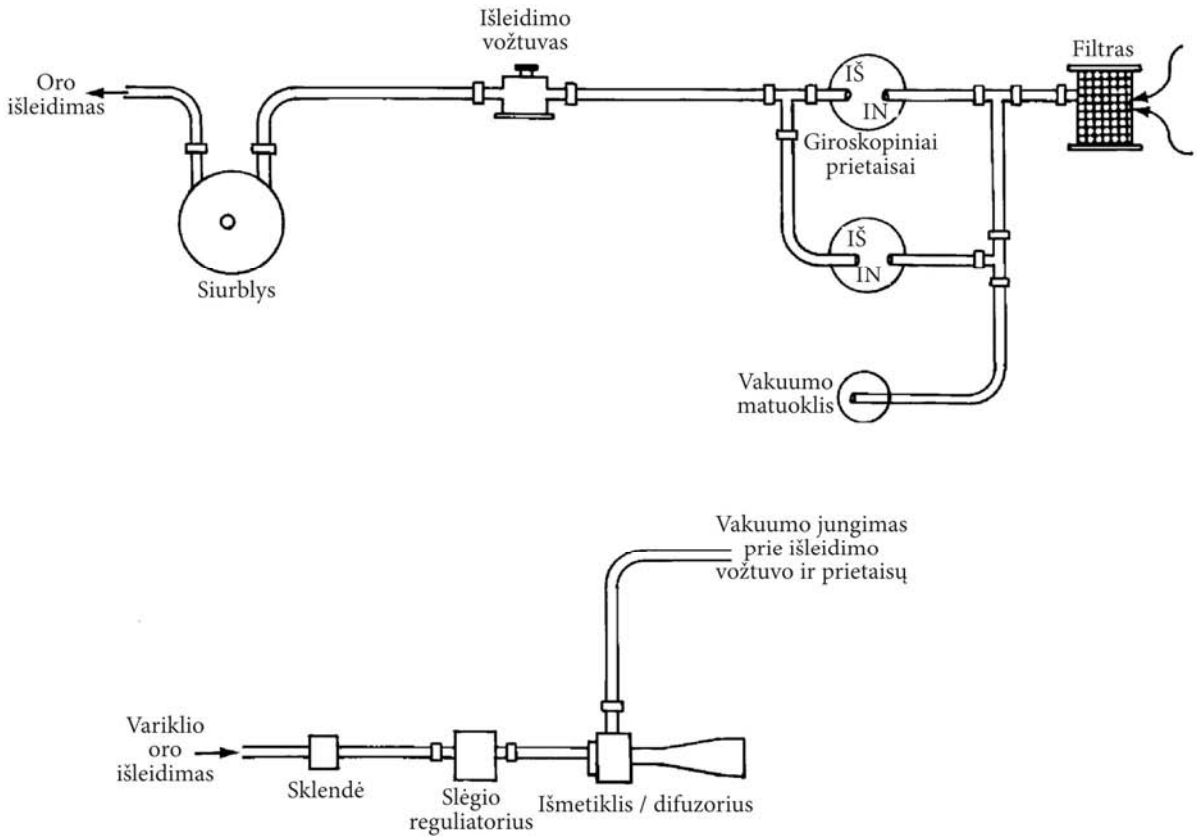
Pneumatinis giromotoras. Pneumatinio giromotoro rotoriaus sukimo pavarai realizuoti giroskopinis prietaisas jungiamas prie atskiro varančiojo vakuuminio siurblio arba orinės reaktyvinės turbinos išorinio difuzoriaus. Toks oro srauto generatorius sukelia giroskopinio prietaiso specialios konstrukcijos rotoriaus sukimąsi, dideliu greičiu tiekdamas per jį neigiamo arba teigiamo slėgio oro srautą.

Tipinė vakuumu valdomos pavaros sistemos schema parodyta 1.2.12 pav. Į ją įeina varantysis siurblys, kuris pneumolaidžiais sujungtas su tam tikrais giroskopiniais prietaisais.

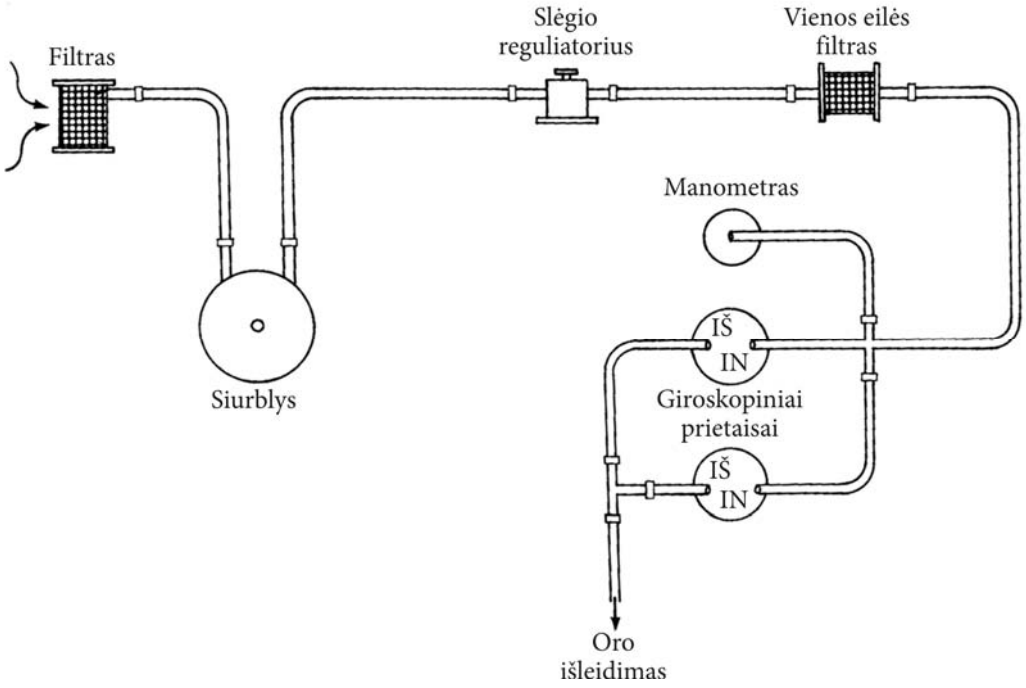
Sistemoje taip pat numatyti vakuumo indikatorius, oro išleidimo vožtuvas ir pagrindinis oro filtras. Dėl siurblio pavaroje susidaro varomasis orinio slėgio nuo 3,5 iki 4,5 atm. skirtumas, kuris reguliuojamas specialiu vožtuvu. Kai kuriuos orlaivio padėties nustatymo prietaisus gali valdyti žemesnis vakuumo lygis, tai pasiekiama įjungiant į sistemą prietaisų rodmenų ribas nustatančius papildomus tiekiamojo slėgio reguliavimo vožtuvus.

Kiti prietaisai turi du prijungimus: vieną, sudarytą iš siurblio, ir kitą, turintį išorinę reaktyvinę oro srauto valdymo sistemą, susietą per pagrindinį oro filtrą su supančia orlaivį atmosfera. Kai giroskopiniams prietaisams valdyti naudojamas vakuumas, slėgis prietaisų korpusų viduje mažinamas, leidžiant išoriniam orui įeiti ir išeiti pro sukamąją reaktyvinę turbiną. Reaktyvinis oro variklis yra gretutinis „kibirėlis“, įterpiamas į varomąją sistemą norint pasiekti pakankamai aukštą valdomų prietaisų rotorių sukimosi greitį.

1.2.13 pav. parodyta analogiškos paskirties slėgiu valdomos pavaros sistemos schema.

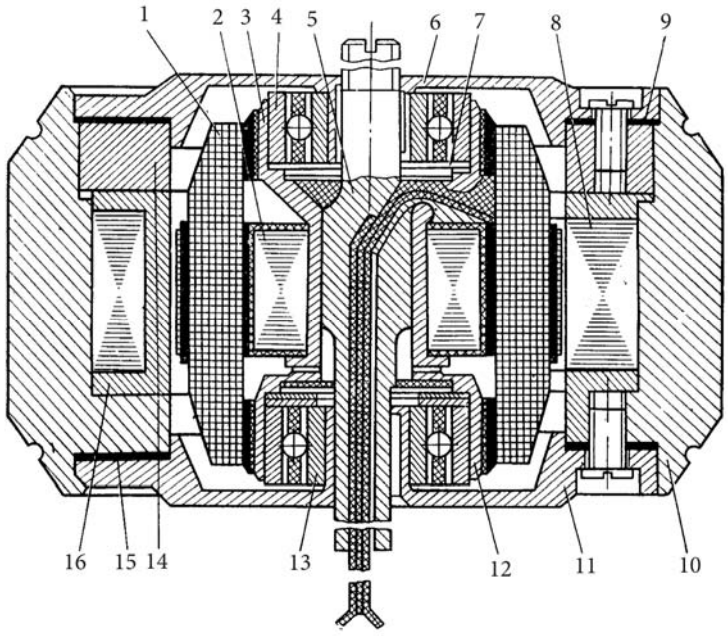


1.2.12 pav. Vakuumu valdomos pavaros sistema



1.2.13 pav. Slėgiu valdomos pavaros sistema

Elektrinis giromotoras. Tai dažniausiai trijų fazių asinchroninis specialios konstrukcijos variklis. Jo konstrukcijos pagrindinė ypatybė ta, kad rotorius gaubia jo viduje esantį statorių (1.2.14 pav.). Tokioje konstrukcijoje išorinis rotorius sukasi aplink viduje esantį statorių.



1.2.14 pav. Giromotoro konstrukcija

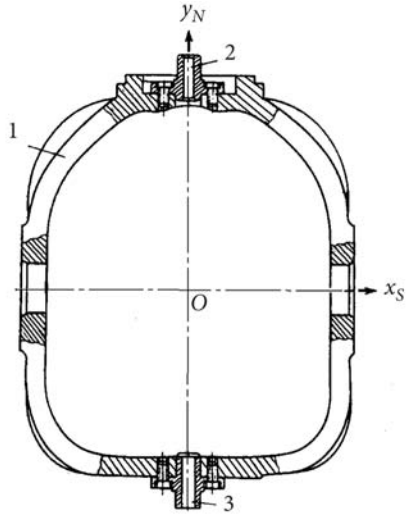
1.2.14 pav. parodytas giromotoras, sudarytas iš rotoriaus, statoriaus, rutulinių guolių atramų ir ašies. Statorius turi geležies paketą *2*, apviją *1* ir įvores *3* ir *12*, nejudamai įtvirtintas ant ašies *5*. Statoriaus įėjimo laidai išvedami į išorę per tuščiavidurę ašies *5* dalį. Rotorius sudarytas iš žalvarinio lanko (gaubto) *10*, geležies paketo *8* su trumpai sujungta apvija *16* ir masyvaus žiedo *14*. Rotoriaus geležies paketas *8* ir žiedas *14* įpresuoti rotoriaus lanke. Jungės *6* ir *11* tampriai įstatytos į lanką *10* ir pritvirtintos prie jo varžtais. Vidiniai rutulinių guolių žiedai *4* ir *13* pritvirtinti ant rotoriaus jungių kakliukų *6* ir *11*. Išorinis guolio *4* žiedas įstatytas į įvorę *3*, o išorinis guolio *13* žiedas – į įvorę *12*. Statoriaus lizde po laisvai įtvirtintu guolio *4* išoriniu žiedu įrengta spyruokliuojanti poveržlė *7*. Ji naudojama giromotoro tiesinių matmenų temperatūriniams pokyčiams kompensuoti. Tarpinės *9* ir *15* sukelia reikiamus ašinius įtempimus guoliuose. Giromotoro ašies galai turi sriegį. Tvirtinant giromotorą girokameroje, ašis praleidžiama per angas girokameros korpuse bei dangtyje ir tvirtinama prie jų veržlėmis. Toks mazgas yra universalus ir naudojamas įvairiuose prietaisuose.

Išorinio rėmo konstrukcija nėra universali. Paprastai ji priklauso nuo aviacinio prietaiso paskirties ir kiekvieno prietaiso tipo ir būna labai ***individuali***.

Giroskopinio prietaiso išorinio rėmo konstrukcijos pavyzdys parodytas 1.2.15 pav. Rėme *1* į tvirtinimo pagal ašį OX_S vietas įstatomi išoriniai rutulinių guolių žiedai. Vidiniuose guolių žieduose tvirtinama girokameros ašis. Pagal ašį OY_N rėme įtvirtinti pusašiai *2* ir *3*, skirti rėmui pakabinti giroskopinio prietaiso korpuse.

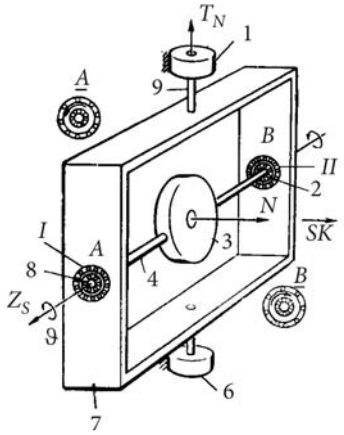
Konstruojant giroskopinius prietaisus, labai svarbu tokias atramas parinkti taip, kad būtų laisvas judesys ir abipusis palaikymo ryšys tarp kardaninės pakabos rotoriaus ir rėmų. Giroskopinių prietaisų atramos skirstomos į pagrindines, kurios sudaro sąlygas laisvai suktis rotoriui, ir kardaninės pakabos atramas, sudarančias galimybę rėmams judėti aplink savo ašis. Tokią klasifikaciją lemia skirtingos atramų darbo sąlygos. Pagrindinės atramos ilgą laiką dirba dideliais apsisukimų greičiais, o kardaninės veikia mažu greičiu nedidelių kampų diapazonu.

Pagrindiniai atramas apibūdinantys kokybės parametrai yra šie: trinties jėgų momento dydis M_{tr}, ašinių ir radialinių laisvumų dydžiai (a ir b), darbo laikas T_d. Trinties jėgų momentas pagrindinėse atramose neturi įtakos giroskopinio prietaiso tikslumui, bet turi įtakos naudojamo giromotoro galingumui ir jo darbo laikui. Trinties momentas kardaninėse atramose turi didelį poveikį giroskopinio prietaiso tikslumui. Todėl, norint ***sumažinti trintį*** kardaninėse atramos pakabose, reikalingos specialios priemonės. Neigiamai tikslumą veikia kardaninės atramos išilginiai ir skersiniai tarpeliai.



1.2.15 pav. Giroskopo išorinio rėmo konstrukcija

Labiausiai paplitusios aviaciniuose giroskopuose yra rutulinių guolių atramos. Šiuolaikiniai rutuliniai guoliai leidžia pasiekti didelį prietaisų tikslumą ir patikimumą. Tais atvejais, kai reikia ***ypatingo tikslumo***, pasitelkiami specialūs konstrukciniai sprendimai. Pavyzdžiui, kurso sistemų giroskopiniuose agregatuose naudojami specialūs sukamieji guoliai (1.2.16 pav.). Trijų laipsnių giroskopo giromazgas *3* pakabintas išoriniame rėme *7* ant ašies *4*, naudojant dvigubus guolius. Vidiniai guolių žiedai *2, 8* giromazgo pakabos kairėje ir dešinėje ašies pusėse sukami į skirtingas puses (sukimo pavara neparodyta). Išorinio rėmo sukimo ašis *9* įtvirtinta guoliuose *1, 6,* kurių išoriniai guoliai pagrindo atžvilgiu nejuda. Teoriškai ir praktiškai įrodyta, kad esant vienodiems ir nedideliems laiko tarpams, kada vidiniai dvigubų guolių žiedai sukami į priešingas puses ir vėliau sukimo kryptis keičiama atvirkščia kryptimi, giroskopas nukrypsta nuo vidutinės padėties lygiais, bet priešingo ženklo kampais, atlikdamas nedidelius svyravimus apie ašių pirminę kinetinio momento padėtį.

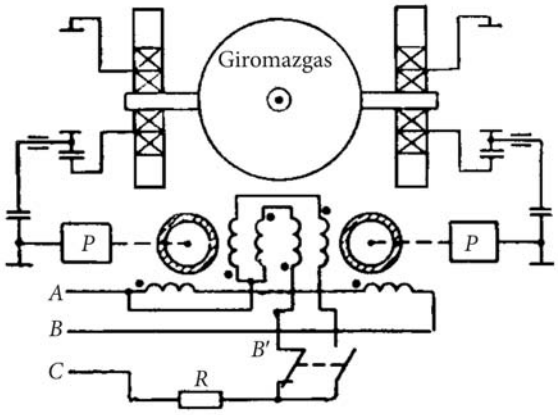


1.2.16 pav. Sukamųjų guolių konstrukcijos schema

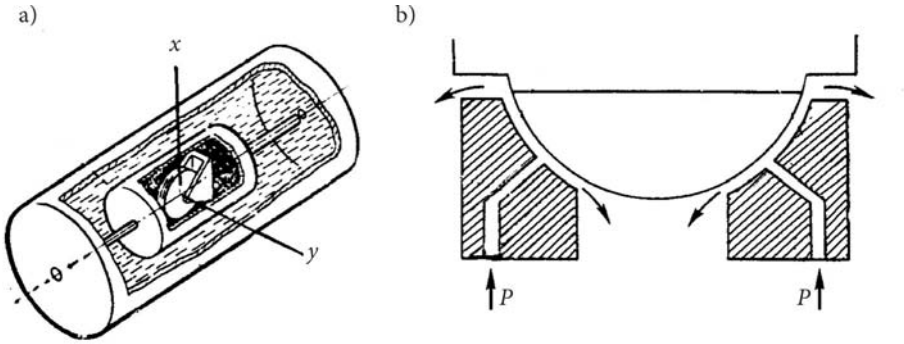
Vidutinių guolių žiedų ***reversinis sukinėjimas*** kurso giroskopų agregatuose (1.2.17 pav.) atliekamas specialiu kumšteliu valdomu jungikliu B'.

Be sukamųjų dvigubų guolių, gali būti naudojamos ir kitokios konstrukcijos, leidžiančios gerokai sumažinti ar net visai eliminuoti trintį giroskopo pakaboje, kompensuojant giroskopo kabinamosios dalies svorio jėgą kita priešingai nukreipta jėga. Prie tokio tipo pakabų priskiriamos: skystinė ir hidrostatinė (1.2.18 pav.), taip pat magnetinė ir elektrostatinė (rečiau naudojamos) pakabos.

Naudojant giroskope ***skystinę pakabą***, hermetiškas giromazgas *1* kabinamas skysčio pripildytame hermetiškame korpuse *2*. Skysčio tankis parenkamas toks, kad giromazgu išspausto skysčio tūrio masė būtų lygi giromazgo masei. Taip pakabomis tenkanti apkrova iš esmės sumažinama iki minimumo.



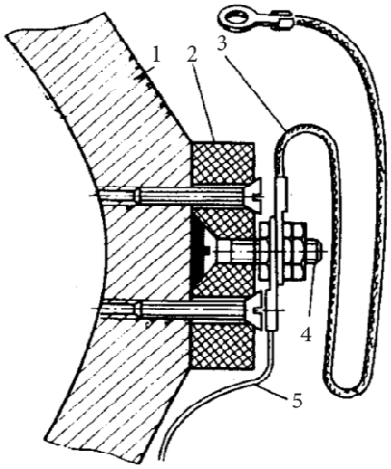
1.2.17 pav. Sukamųjų guolių vidurinių žiedų sukimo pavara



1.2.18 pav. Giroskopų pakabų pavidalai:
a – skystinė; b – hidrostatinė

Hidrostatinėje pakaboje skystis (dujos) tiekiamas su slėgiu per siauras kiaurymes *1* į tarpą *2* tarp atramos *4* nejudamosios dalies ir giromazgo *3* (1.2.18 pav., b). Svorinės apkrovos tarpo *2* susiaurėjimas mažina skysčio sąnaudas ir didina vietinį slėgį. Pakabos parametrai parenkami taip, kad vietinio slėgio jėgų suma atsvertų (subalansuotų) giromazgo svorio jėgą, esant šimtųjų milimetro dalių tarpui.

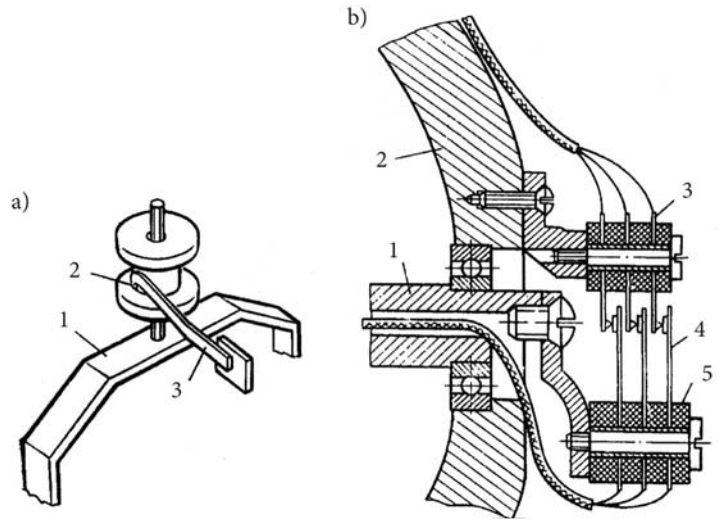
Energijos perdavimo elementai Kad būtų galima perduoti išorinių šaltinių elektros energiją giroskopinių prietaisų elementams, kurie yra vienas kito atžvilgiu judančiuose mazguose, reikalingi energijos perdavimo elementai. Tokiais įtaisais sudaromas elektrinis ryšys tarp elementų, kurie yra prietaiso korpuse ir išoriniame rėme arba vidiniame ir išoriniame rėmuose. Paprasčiausiai elektros energija perduodama naudojant ***lanksčiuosius*** laidus (1.2.19 pav.).



1.2.19 pav. Lanksčiojo laido, naudojimo elektros energijai perduoti, schema

Lankstusis laidas *3* – tai metalinių gyslų pluoštas, turintis išorinę izoliaciją. Gyslų galai įtvirtinti bendrame antgalyje, kuris prisukamas prie pereinamųjų kontaktų *4*, sujungtų su standžiuoju laidu *5*. Standusis laidas *5* yra ant giroskopo pakabos detalės *1*. Kontaktai montuojami izoliuojančioje kaladėlėje *2*. Tais atvejais, kada tarpusavio pasisukimo kampai yra pakankamai dideli, energijai perduoti naudojami judamieji (slydimo ir taškiniai) kontaktai (1.2.20 pav.).

1.2.20 pav., a parodyta slydimo kontaktų konstrukcija. Šliaužiklis *3*, per kurį tiekiama elektros srovė, šliaužia srovę priimančiu žiedu *2*. Šis žiedas *2* nuo rėmo ašies *1* izoliuotas ištisine izoliacine mova, turinčia antbriaunius, kurie neleidžia šliaužikliams nuslysti nuo žiedo. Kai pakabos detalių sujungimo vietose reikia sudaryti daugiau tarpusavyje izoliuotų elektros perdavimo linijų, prie pakabos ašies statomas reikiamas skaičius srovę priimančių žiedų.



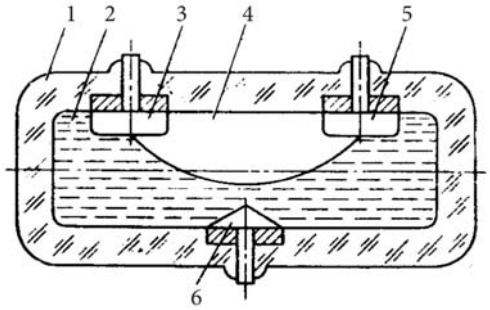
1.2.20 pav. Prietaisuose naudojami kontaktiniai įtaisai:
a – slydimo; b – taškinių kontaktų konstrukcija

Plačiai naudojami elektros energijos perdavimo įtaisai su taškiniais kontaktais. Jie skiriasi nuo slydimo kontaktų tuo, kad kontakto taškas yra srovei laidžių elementų sukimosi ašyje. Tokių kontaktų grupės konstrukcija parodyta (1.4.20 pav., b). Kiekvienas taškinis kontaktas sudarytas iš nejudamojo *3* ir judamojo *4* kontaktų, sudarančių kontaktinę porą. Pateiktame pavyzdyje nejudamieji kontaktai pritvirtinti prie išorinio rėmo *2*, o judamieji – ant vidinio rėmo *1* sukimosi ašies. Kontaktai *3* ir *4* izoliuoti nuo pakabos metalinių detalių elektrą izoliuojančia medžiaga *5*.

Korekcijos įtaisai. Giroskopinių prietaisų korekcijos įtaisai, veikdami giroskopą išoriniais valdančiaisiais (koreguojančiaisiais) jėgų momentais, leidžia palaikyti reikiamą giroskopo pagrindinės ašies kryptį arba kompensuoti giroskopo nuokrypius. Pagrindiniai korekcijos įtaisų mazgai yra jautrusis elementas arba korekcijos daviklis ir valdymo įrenginys.

Korekcijos davikliais vadinami įtaisai, stabiliai išlaikantys nustatytą atraminę kryptį. Aviaciniuose prietaisuose daugiausia naudojami gravitaciniai, aerodinaminiai, magnetiniai ir pagal dangaus šviesulius orientuoti korekcijos davikliai. ***Gravitacinių*** daviklių atraminė yra vietos vertikalės kryptis, sutampanti su svorio jėgos pagreičio kryptimi. ***Magnetiniai*** davikliai reaguoja į Žemės magnetinį lauką, todėl jų atraminė kryptis yra magnetinio meridiano kryptis. Korekcijos davikliai, orientuojami pagal ***dangaus šviesulius***, leidžia numatyti stabilią kryptį į Saulę, Mėnulį, kitas planetas arba žvaigždes. Korekcijos įtaisų ***valdymo įrenginių*** funkcijas paprastai atlieka dviejų fazių asinchroniniai varikliai arba potenciometrinės bei selsininės sinchroninės sistemos.

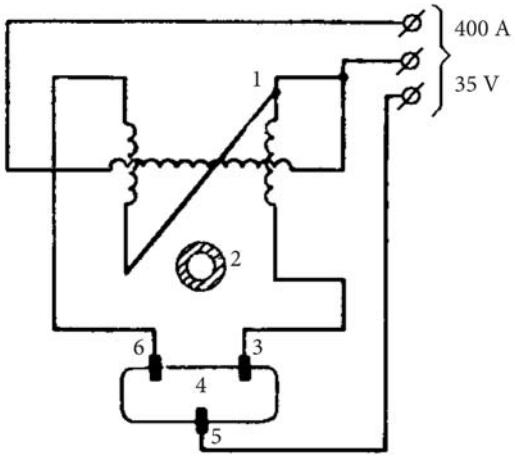
Gravitaciniai korektoriai. Labiausiai paplitę gulsčiuko principo vertikaliosios krypties korekcijos davikliai. Naudojami vienos ir dviejų koordinačių korekcijos gulsčiukiniai davikliai.



1.2.21 pav. Vienos koordinatės korekcijos gulsčiukinio daviklio konstrukcija

Vienos koordinatės gulsčiukinis daviklis (1.2.21 pav.) – tai stiklinis balionas su jame įtvirtintais platiniais elektrodais *3, 5, 6*. Balionas užpildytas elektrai laidžiu skysčiu (elektrolitu) *2* taip, kad, esant daviklio horizontaliajai padėčiai, likęs oro burbulas *4* lygiai ir maždaug per pusę padengtų elektrodus *3, 5*.

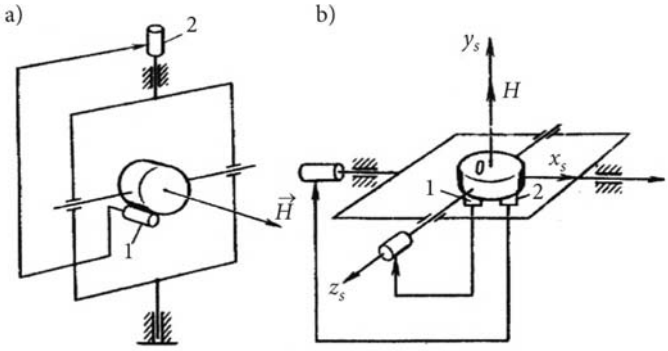
Gulsčiukinio daviklio ir valdymo įrenginio (asinchroninio variklio) tarpusavio sąveikos elektrinė schema pateikta (1.2.22 pav.). Elektrodai *3* ir *6* sujungti su variklio *2* valdymo apvijomis. Bendrasis valdymo apvijų taškas *1* sujungtas su viena kintamosios srovės maitinimo šaltinio faze. Centrinis elektrodas *5* prijungtas prie kitos fazės.



1.2.22 pav. Vienos koordinatės korekcijos sistemos elektrinė schema

Trijų laipsnių giroskopo pagrindinės ašies ***horizontaliosios*** korekcijos schema pateikta 1.2.23 pav., a, kurioje gulsčiukinis daviklis pažymėtas indeksu *1*, o koreguojantysis variklis – *2*. Ten pat (1.2.23 pav., b) pateikta giroskopo pagrindinės ašies korekcijos schema pagal ***vietos vertikalę***. Kai pagrindinė giroskopo ašis yra horizontali, atitinkamai horizontalus yra ir daviklis. Elektrinė varža tarp centrinio elektrodo *5* ir (1.2.23 pav.) kiekvieno iš kraštinių elektrodų *3* ir *6* yra lygi per valdomąsias koreguojančiojo variklio apvijas teka vienodo dydžio ir priešingos krypties srovės. Šiuo atveju variklis *2* neveikia ir nesukelia jėgos momento. Giroskopo pagrindinei ašiai nukrypus nuo horizontaliosios padėties, oro burbulas daviklyje pasislenka elektrodų *3* ir *6* atžvilgiu ir keičia elektrolito bei elektrodų kontaktinius paviršius. Grandinių elektrinė varža tarp centrinio *5* ir kraštinių elektrodų *3* ir *6* pasikeičia. Varža padidėja to elektrodo grandinėje, kurio paviršiaus kontaktas su elektrolitu yra mažesnis. Šiuo atveju per valdomas koreguojančiojo variklio *2* apvijas pradeda tekėti skirtingo dydžio ir priešingos krypties srovės, todėl variklis *2* sukelia sukimo momentą išorinio rėmo ašies atžvilgiu ir giroskopas pradeda precesinį judesį giromazgo pakabos ašies atžvilgiu.

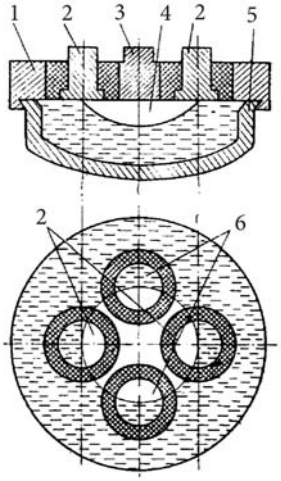
1.2.23 pav., a parodyta schema veikia taip, kad koreguojantysis variklis sukelia giroskopo precesinį judesį kryptimi, kuriai esant pagrindinės ašies išderinimo kampas horizonto plokštumoje sumažėja.



1.2.23 pav. Trijų laipsnių giroskopo pagrindinės ašies korekcija:
a – horizontaliosios korekcijos schema; b – vietos vertikalės krypties korekcijos schema

Analogiškas vienos koordinatės gulsčiukinis daviklis gali būti panaudotas ir trijų laipsnių giroskopo pagrindinės ašies, nukreiptos pagal vietos vertikalę, padėčiai išlaikyti (1.2.23 pav., b). Giroskopo ašis sutaps su vietos vertikalės kryptimi, jei ašys OX_S ir OZ_S bus horizonto plokštumoje. Tai pasiekiama atitinkamai išdėstant gulsčiukinius daviklius. Švytuoklės *1* jautrumo ašis nukreipiama lygiagrečiai su ašimi OZ_S, švytuoklės *2* jautrumo ašis – lygiagrečiai su OX_S. Kartais švytuoklė *1* dedama ant išorinio rėmo. Tokiu atveju ji taip pat reaguoja į giroskopo ašies OX_S nukrypimą nuo horizonto plokštumos. Korekcijos pagal ašis OX_S ir OZ_S elektrinės schemos yra analogiškos 1.2.23 pav. pateiktai schemai.

Dažnai trijų laipsnių giroskopo pagrindinės ašies korekcijai naudojami dviejų koordinačių gulsčiukiniai davikliai (1.2.24 pav.).

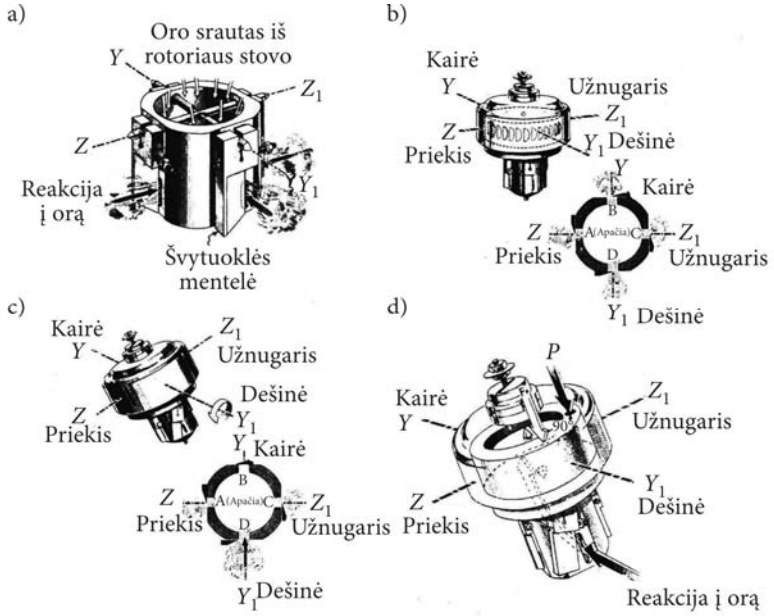


1.2.24 pav. Dviejų koordinačių korekcijos gulsčiukinio daviklio schema

Ant metalinio korpuso *1* sumontuotos dvi poros *2* ir *6* tarpusavyje ir nuo korpuso izoliuotų elektrodų, kurie išdėstyti pagal apskritimą vienodais nuotoliais vienas nuo kito. Korpusas *1* sujungtas su metaliniu dangčiu *5*. Dangtis beveik pilnai, išskyrus oro burbulą *4*, užpildytas elektrolitu. Kiekviena elektrodų pora *2, 6* ir centrinis kontaktas *3* veikia analogiškai, kaip ir vienos koordinatės daviklyje.

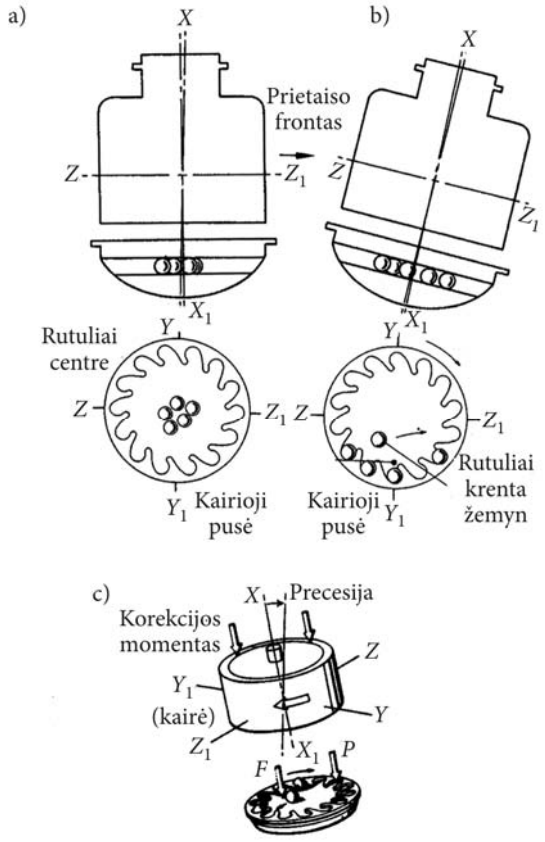
Vertikaliosios krypties korektoriai. Prie gravitacinių JE priskiriami pakankamai paplitę ir be papildomų valdymo įrenginių veikiantys mechaninės švytuoklės principo vertikaliosios krypties korektoriai.

Vienas tokio tipo konstrukcijos korektorių pateiktas 1.2.25 pav. Cilindro pavidalo ***aerodinaminis švytuoklinis korektorius*** tvirtinamas giromazge taip, kad giromotoro rotoriaus ir daviklio ašys sutaptų. Priešingose korektoriaus cilindro šonuose yra keturios ortogonaliai išdėstytos angos, kurios, korektoriui esant vertikalioje padėtyje, hermetiškai uždarytos švytuoklinių mentelių sklendėmis. Giroskopo pagrindinei ašiai nukrypus nuo vertikaliosios padėties, veikiamos gravitacinio momento švytuoklinių mentelių sklendės atsidaro ir nukreipia praeinantį per korektoriaus cilindrą oro srautą kita kryptimi. Pakitusios krypties oro srautas savo ruožtu sukelia giroskopo pagrindinės ašies nuokrypiui pasipriešinantį aerodinaminį jėgos momentą.



1.2.25. Dviejų koordinačių korekcijos švytuoklinio korektoriaus konstrukcija

Kita gravitacinio švytuoklės principo vertikaliosios krypties korektoriaus konstrukcija pavaizduota 1.2.26 pav. Šiame korektoriuje, panašiai kaip ir skystiniame gulsčiukiniame korekcijos daviklyje (1.2.24 pav., a), nukrypstant giroskopo rotoriaus sukimosi ašiai vietos vertikalės atžvilgiu, susieto su giroskopo rotoriumi, korektoriaus skritulio formos dubens centre (1.2.26 pav., a) esantys metaliniai rutuliai rieda į ašies polinkio pusę ir sukrinta į specialias dubens kraštuose padarytas nišas (1.2.26 pav., b).

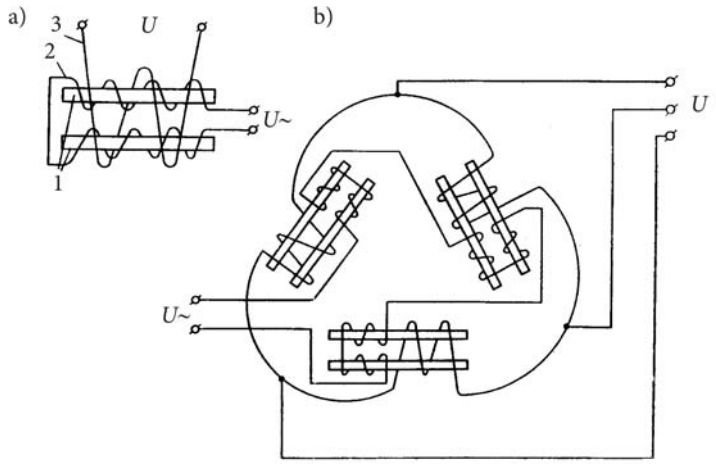


1.2.26 pav. Rutulinis gulsčiuko principo vietos vertikalės korektoriaus mazgas:
a – giroskopas vertikaliojoje padėtyje; b – giroskopas, pakrypęs frontalinės plokštumos atžvilgiu; c – vertikalioji precesija

Besisukdami dubens radialinėje kraštinėje esančiose nišose rutuliai, veikiami išcentrinių jėgų, sukelia jėgos momenta, priešingą galimos vertikaliosios precesijos momentui, t. y. koreguoja (atkuria) atsirandantį giroskopo ašies nuokrypį.

Magnetiniai korekcijos davikliai. Naudojami giroskopo pagrindinės ašies nukrypimo nuo magnetinio meridiano plokštumai nustatyti. Paprasčiausias tokio tipo daviklis yra magnetinė rodyklė. Tačiau dėl blogo magnetinės rodyklės atsistatymo momento šiuolaikiniuose aviaciniuose prietaisuose dažniausiai naudojami indukciniai korekcijos davikliai (1.2.27 pav., a).

Jie sudaromi iš dviejų vienodų, lygiagrečių strypų *1* iš permalojaus su išdėstytomis ant jų apvijomis *2*, maitinamų kintamąja įtampa, kurių dažnis w_P, ir antrinės (signalinės) apvijos *3*, gaubiančios abu strypus. Pirminės apvijos apvyniotos ant strypų priešinga kryptimi.



1.2.27 pav. Indukcinio daviklio schema:
a – jautrusis elementas; b – trijų jautriųjų elementų daviklis

Ant pirminių apvijų sudaromi vienodi ir priešingos krypties kintamieji magnetiniai laukai, kurie nesukeliantys signalinėje apvijoje elektrovaros. Tačiau dėl sukeliamų strypuose magnetinių srautų kintamumo jų magnetinė skverbtis μ_S periodiškai kinta pagal dėsnį:

$$\mu_S = \mu_0 + \mu_a \cos 2w_P t\,, \tag{1.2.9}$$

čia μ_0, μ_a – pastovioji ir kintamoji magnetinės skvarbos dedamosios.

Jei magnetinis JE yra horizonto plokštumoje, tai horizontalioji magnetinio Žemės lauko stiprumo dedamoji $H_Ž^h$ strypuose sukelia indukciją B_S ir dėl to atsirandančius pastovius magnetinius srautus:

$$\Phi_S = B_S S = H_Ž^h \mu_S \cos\psi_m S\,, \tag{1.2.10}$$

čia S – strypų pjūvio plotas.

Tokiu atveju abiejuose strypuose srautų kryptys vienodos, o dydžiai proporcingi strypo medžiagos magnetinei skvarbai ir kampo ψ_m, esančio tarp magnetinio meridiano krypties ir strypų išilginių ašių krypties, kosinusui. Kadangi strypų magnetinė skverbtis periodiškai kinta dėl magnetinių srautų kintamumo, sukeliamo kintamosios pirminių apvijų įtampos, pastovūs magnetiniai srautai nuo Žemės magnetinio lauko įtakos strypuose transformuojasi į kintamuosius. Šie srautai nukreipti strypuose vienoda kryptimi ir indukuojami signalinėje apvijoje EVJ, dėl ko signalinės apvijos išėjime atsiranda kintamoji įtampa:

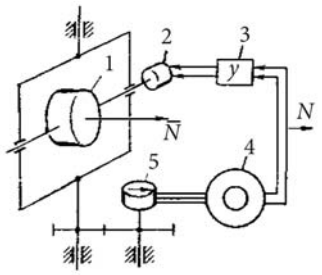
$$U_{iš} = -W\frac{d\Phi_S}{dt}10^{-8} = U_{iš}^a \sin 2w_P t\,, \tag{1.2.11}$$

čia $U_{iš}^a = kH_Ž^h \cos\Psi_m$; W – vijų skaičius signalinėje apvijoje; k – koeficientas.

Amplitudinė išėjimo įtampos $U_{iš}^{a}$ signalinėje apvijoje reikšmė priklauso nuo strypų padėties magnetinio meridiano atžvilgiu, kurią nusako kampas ψ_m.

Iš (1.2.4) išraiškos matyti, kad indukcinis JE neleidžia nustatyti strypų posūkio kampo ženklo magnetinio meridiano atžvilgiu $\left[\cos\left(\pm\Psi_m\right)=\cos\Psi_m\right]$ ir taip pat nustatyti kurso nuo 0 iki 360°, kadangi cos ψ_m keičiasi nuo 1 iki 0 kampų intervale nuo 0 iki 90°. Todėl šiuolaikiniuose aviaciniuose prietaisuose naudojami indukciniai davikliai, sudaryti iš trijų indukcinių JE, išdėstytų vienas kito atžvilgiu 60° kampu. Signalinės JE apvijos sujungtos pagal trikampio schemą (1.2.27 pav., b).

Trijų laipsnių giroskopo korekcijos indukcinio daviklio magnetinio meridiano plokštumoje schema pateikta 1.2.28 pav. Pradiniu momentu giroskopo *1* pagrindinė ašis sutampa su magnetinio meridiano kryptimi. Išorinio rėmo ašis per reduktorių yra sujungta su ašimi, kurioje yra indukcinis daviklis *5*. Šio daviklio *5* signalas perduodamas į selsiną-imtuvą *4*. Iš rotorinės selsino-imtuvo apvijos signalas patenka į stiprintuvą *3*, o nuo jo – į variklį *2*. Jei pagrindinė giroskopo ašis nukrypsta nuo magnetinio meridiano krypties, indukcinio daviklio jautrumo ašis pasisuka Žemės magnetinio lauko horizontaliosios dedamosios atžvilgiu, ir iš indukcinio daviklio signalas per selsiną *4* ir stiprintuvą *3* patenka į variklį *2*. Variklis sukelia jėgos momentą giromazgo pakabos ašies atžvilgiu, kuris sužadina giroskopo precesinį judesį išoriniam rėmui, mažinantį giroskopo pagrindinės ašies ir indukcinio daviklio jautrumo ašies nuokrypį nuo magnetinio meridiano krypties, kol šis nuokrypis ir indukcinio daviklio signalas taps lygus nuliui.



1.2.28 pav. Trijų laipsnių giroskopo korekcijos schema magnetinio meridiano plokštumoje

Tokios schemos trūkumas yra tas, kad giroskopo išorinio rėmo sukimosi ašis apkraunama papildomu trikdančiuoju jėgos momentu, atsiradusiu dėl trinties indukcinio daviklio ašies guolyje, ir jo inertiškumo šios ašies atžvilgiu. Toks papildomas momentas labai sumažina prietaiso tikslumą.

Analogiškai veikia sistemos su orientuotais pagal dangaus šviesulius JE. Tokiu atveju vietoje indukcinio daviklio naudojamas kryptingas šviesulio šviesos srauto intensyvumui jautrus daviklis, pateikiantis informaciją apie JE, ašies nukrypimą.

Korekcijos išjungikliai skirti įvairioms giroskopinių prietaisų korekcijos sistemų elektrinėms grandinėms išjungti, kai posūkius atlikdamas orlaivis pasiekia nustatytą posūkio greitį. Orlaiviui darant posūkį atsirandančios išcentrinės jėgos sukelia tiesinius pagreičius, neigiamai veikiančius koreguojančiųjų įtaisų jautriuosius elementus, dėl ko nuo pasirinktosios padėties krypsta giroskopo pagrindinė ašis. Norint išvengti neteisingos korekcijos, orlaivio posūkių metu reikia ***išjungti*** tam skirtus įrenginius. Tačiau, esant mažiems posūkių kampiniams greičiams, ilgalaikis korekcijos išjungimas gali sukelti esminius giroskopo ašies nuokrypius, didesnius už galimas paklaidas, atsirandančias veikiant išcentrinėmis jėgomis. Tai riboja ***žemiausią*** kampinio greičio dydį, kuriam esant tikslinga išjungti korekciją.

Slopintuvai. Giroskopinių prietaisų slopintuvų paskirtis – sukelti jėgos momentus, atvirkščiai proporcingus giroskopo judamosios sistemos sukimosi greičiui. Jie reikalingi daugelyje giroskopinių prietaisų judamosios sistemos virpesiams slopinti ir reikiamoms dinaminėms charakteristikoms suformuoti. Giroskopiniuose prietaisuose taikomi pneumatiniai, hidrauliniai ir magnetoelektriniai slopintuvai.

Pneumatinis slopintuvas paprastai naudojamas kaip cilindras su jo viduje esančiu judamuoju stūmokliu, kurio kotas per kinetinę jungtį susietas su judamosios giroskopinio prietaiso dalies ašimi. Cilindras tvirtinamas prietaiso korpuse. Cilindro dugne yra kapiliarinė anga orui eiti, kurios dydis reguliuojamas varžtu. Cilindro stūmokliui judant, oras siurbiamas arba išstumiamas iš cilindro per kapiliarinę kiaurymę, sukeliant judamosios sistemos slopinimą.

Hidrauliniame slopintuve naudojamas hermetizuotas cilindras, pakabinamas ant ašies hermetizuotame prietaiso korpuse, kuriame yra giroskopo judamoji sistema. Erdvė tarp prietaiso korpuso ir cilindro užpildoma specialiu (klampiu) skysčiu. Sukantis cilindrui skystis sukelia hidraulinį slopinimą, kuris turi daug privalumų, palyginti su pneumatiniu. Pavyzdžiui, dėl skysčio nespūdumo slopinimo momentas yra proporcingas cilindro sukimosi kampiniam greičiui, o tai nebūdinga pneumatiniam slopintuvui. Be to, skystis iš dalies kompensuoja cilindro su judamąja sistema svorį ir sumažina slėgį atramose, todėl sumažėja trintis ir padidėja prietaiso tikslumas.

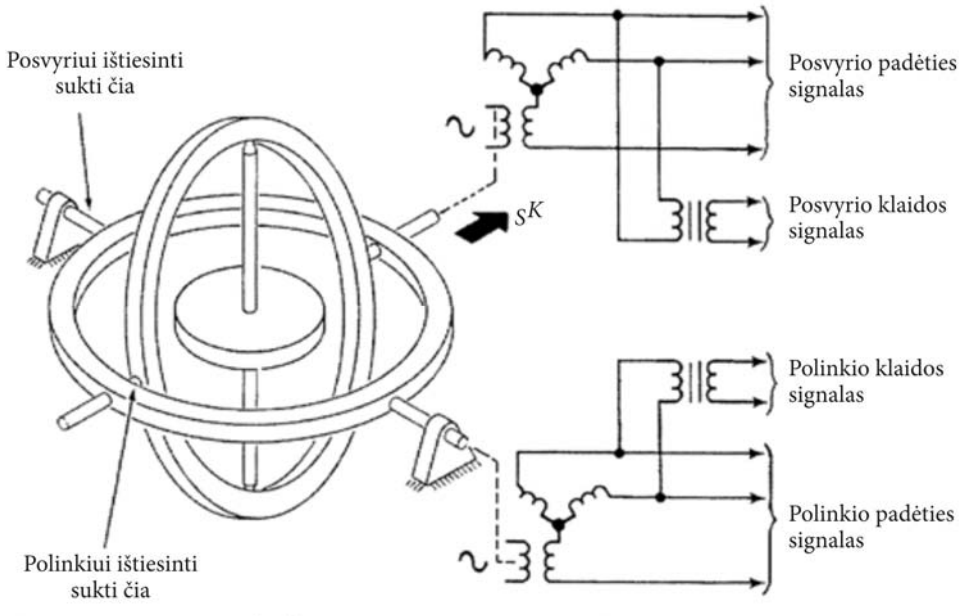
Magnetoelektriniai slopintuvai pagrįsti ritės, per kurią teka srovė, magnetinio lauko sąveika su pastoviojo magneto lauku. Ritė paprastai būna prietaiso korpuse, o pastovusis magnetas susiejamas su giroskopinio prietaiso judamąja sistema ir, sukantis judamajai sistemai, pasisuka ritės atžvilgiu. Atsirandanti ritės ir magneto magnetinių laukų sąveika sukelia pasipriešinimo momentą judamosios sistemos pakabos ašies atžvilgiu, proporcingą jos posūkio greičiui.

Matavimo rezultatų nuskaitymo įtaisai. Giroskopinių prietaisų matavimo rezultatai, naudojami valdant skrydžius, nuskaitomi tiesiogiai arba pateikiami elektriniais kanalais į atitinkamus rodytuvus. Rezultatams vizualiai nuskaityti naudojami įvairūs rodykliniai įtaisai ir indikatoriai. Šie įtaisai tiesiog yra giroskope arba sujungiami su juo nuotoliniu būdu (1.2.29 pav.).

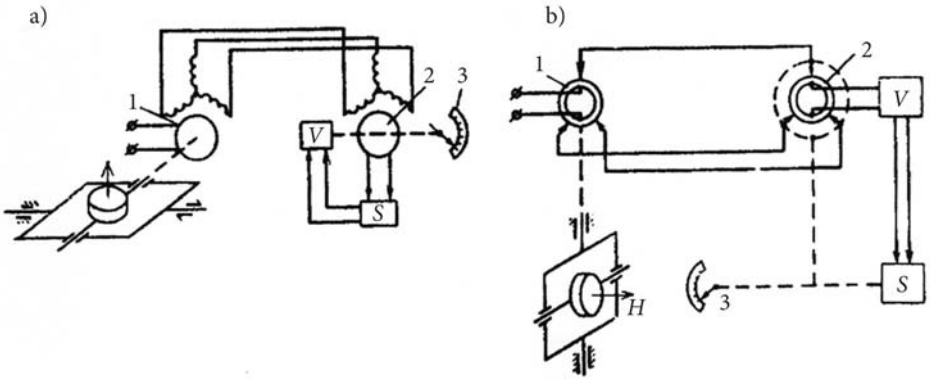
Pirmuoju atveju dėl mechaninių jungčių sudaroma galimybė stebėti giroskopo išorinio rėmo judesį kardaninėje pakaboje prietaiso korpuso atžvilgiu. Taip galima nustatyti, pavyzdžiui, priklausomai nuo prietaiso paskirties orlaivio polinkio arba kurso kampą.

Antruoju atveju kardaninės pakabos rėmų posūkio kampai perduodami į rodytuvą taikant nuotolinio perdavimo selsinines sistemas (1.2.30 pav., a). Giroskopo vidinio rėmo posūkio kampas išorinio rėmo atžvilgiu (arba išorinio rėmo posūkio kampas prietaiso korpuso atžvilgiu) sukelia selsino-daviklio *1* rotoriaus posūkį jo statoriaus atžvilgiu. Tada įtampa nuo selsino-imtuvo *2* apvijos tiekiama į variklį *V* per stiprintuvą *S*. Selsino-imtuvo *2* rotorius ir kartu rodytuvo rodyklė *3* pasisuka taip, kad į stiprintuvą patenkanti įtampatampa lygi nuliui. Rodyklės posūkis rodytuve bus proporcingas giroskopo rėmų posūkiui.

Giroskopų kardaninės pakabos rėmų posūkio kampai gali būti perduodami rodytuvo rodyklei taikant potenciometrines sistemas (1.2.30 pav., b). Nuotolinio perdavimo sistemos potenciometro *1* korpusas susiejamas su išorinio rėmo ašimi, o jo šliaužikliai tvirtinami ant prietaiso korpuso. Šiam prietaiso korpusui kartu su orlaiviu pasisukus išorinio nejudamojo rėmo atžvilgiu, išbalansuojama perdavimo sistema. Nuo potenciometro *2* signalas per stiprintuvą *S* patenka į variklį *V*. Variklio rotorius pasuka potenciometro *2* šliaužiklius ir kartu su jais – rodytuvo *3* rodyklę, kol į stiprintuvą *S* patenkanti įtampa tampa lygi nuliui. Rodytuvo *3* rodyklės posūkis bus proporcingas orlaivio posūkio kampui išorinio giroskopo rėmo atžvilgiu.



1.2.29 pav. Polinkio ir posvyrio kampų nuskaitymo ir distancinio perdavimo schema

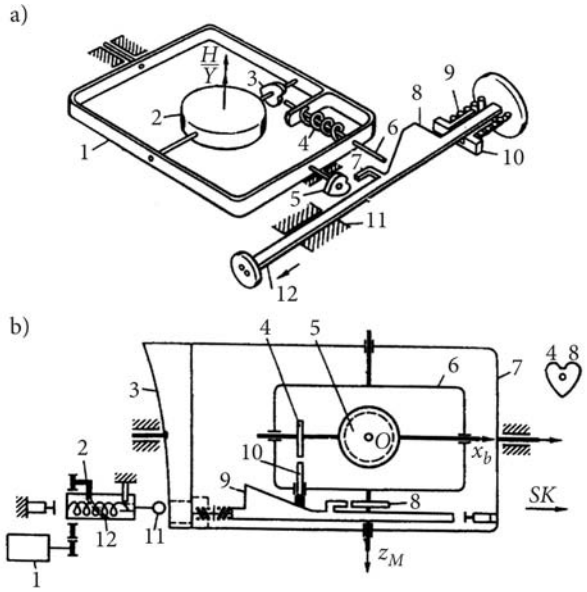


1.2.30 pav. Matavimo rezultatų nuskaitymas:
a – selsininė; b – potenciometrinė sekimo sistema

Norint perduoti giroskopinių prietaisų ***matavimų rezultatus*** į orlaivio valdymo sistemas, tai atliekama naudojant nuotolinio perdavimo priemones su potenciometriniais davikliais, selsinais, sinusiniais-kosinusiniais transformatoriais ir indukciniais davikliais. Pakankamas perduodamų signalų galingumas leidžia daugeliu atvejų apsieiti be tarpinių stiprintuvų.

Potenciometriniai davikliai yra pakankamai paprasti, tinka taikyti nuolatinės ir kintamosios srovės schemose, tačiau turi ir trūkumų: perdavimo diskretiškumas, didelis trinties momentas, nedidelis patikimumas dėl esamų mechaninių kontaktų. Šių trūkumų neturi indukciniai davikliai, selsinai ir sinusiniai-kosinusiniai transformatoriai. Tačiau visi jie turi sudėtingesnę konstrukciją ir esant dideliems posūkio kampams, – netiesines perdavimo charakteristikas.

Aretyrai giroskopiniuose prietaisuose naudojami tam, kad būtų galima fiksuoti pagrindinę giroskopo ašį tam tikroje numatytoje padėtyje prietaiso korpuso atžvilgiu paruošimo darbui metu. Dažniausiai aretyrai statomi aviahorizontuose. Jie valdomi tiesioginiu ir nuotoliniu būdu (1.2.31 pav.).



1.2.31 pav. Aretyruojančių įtaisų pavidalai:
a – su tiesioginiu (rankiniu) valdymu; b – su nuotoliniu valdymu

Tiesiogiai aretyriuojant giroskopą su besisukančiu rotoriumi (1.2.31 pav., a), stūmiklis *12* ranka pastumiamas rodykle nurodyta kryptimi pagal kreipiamąsias *10* ir *11*, spaudžiant spyruoklę *9*. Stūmiklio *12* viršūnė *7* remiasi į kumštelį *5*. Tangentinė spaudimo į kumštelį *5* jėgos komponentė sukelia momentą išorinio rėmo sukimosi ašies atžvilgiu. Veikiant šiam momentui, giroskopas atlieka precesijos judesį giromazgo pakabos ašies atžvilgiu.

Giroskopo pagrindinės ašies krypčiai sutapus su išorinio rėmo pakabos ašies kryptimi, giroskopas praranda vieną laisvės laipsnį ir pradeda suktis išorinio rėmo ašies atžvilgiu, kol stūmiklio *12* viršūnė *7* įeis

į kumštelio *5* griovelį. Tuo pat metu stūmiklio *12* pleištas *8* veikia stūmiklį *6*, kuris spaudžia kumštelį *3* ir sukelia jėgos momentą giromazgo pakabos ašies atžvilgiu. Judant stūmikliui *6* spyruoklė *4* susispaudžia. Stūmiklio *6* spaudimas į kumštelį *3* sukelia giroskopo judesį giromazgo ašies atžvilgiu iki stūmiklis *6* patenka į kumštelio *3* griovelį (išpjovą). Aviahorizontas pagal abi ašis yra aretyravimo būsenos. Išeinant iš aretyravimo būsenos, stūmiklis *12*, veikiamas spyruoklės *9,* perstumiamas priešinga kryptimi. Tuo pat metu ir stūmiklis *6*, veikiamas spyruoklės *4,* grįžta į pirminę padėtį. Giroskopas įgyja laisvę suktis aplink giromazgo ir išorinio rėmo pakabos ašis.

Nuotolinio valdymo aretyro schema pavaizduota 1.2.31 pav., b. Prijungus prie variklio *1* įtampą, jo rotorius pradeda suktis ir sukelia koto *12* slenkamąjį judesį dėl piršto *2*, judančio sriegio išpjovoje ant koto. Įtvirtintas koto *12* gale ritinėlis *11* spaudžia į papildomo rėmo *7* briaunos kumštelį *3*. Rėmas *7* pasisuka ir nusistato padėtyje, prie kurios išorinio rėmo ašis OZ_n lygiagreti su skersine orlaivio ašimi. Šioje padėtyje ritinėlis *11* nuslysta nuo kumštelio *3* ir pradeda spausti stūmiklį *9*. Šio stūmiklio *9* atrama spaudžia į profiliuotąjį kumštelį *8*, pritvirtintą ant išorinio rėmo ašies. Veikiant tuo metu momento sukeliamai jėgai, giroskopas atlieka precesinį judesį giromazgo *5* pakabos ašies OX_S atžvilgiu ir pasiekia atramą. Pasibaigus procesiniam judėjimui, giroskopas pasisuka aplink išorinio rėmo ašį, kol stūmiklio *9* viršūnė įeina į kumštelio *8* griovelį. Tuo pat metu stūmiklis *10* slenka nuožulniu stūmiklio 9 paviršiumi ir pradeda spausti kumštelį *4*. Stūmiklio *10* spaudimo į kumštelį *4* pasekmė – giromazgas *5* pasisuka jo pakabos ašies atžvilgiu, stūmiklis *10* įeina į kumštelio *4* griovelį, o giromazgas nusistato taip, kad pagrindinė giroskopo ašis tampa statmena ašims OX_g ir OZ_n. Visas aretyravimo ciklas atliekamas per vieną reduktoriaus krumpliaračio apsisukimą. Tada pirštas *2* patenka į koto *12* išilginį griovelį ir, veikiamas spyruoklių, grįžta į pirminę padėtį bei sudaro galimybę stūmokliams *9* ir *10* išlaisvinti kumštelius *8* ir *4*. Taigi aretyras, įvedęs giroskopą į tam tikrą aretyravimo būseną, iškart jį iš jos išlaisvina.

1.2.3. Padėties indikatorius (vertikalo giroskopas)

Orlaivio skrydžio neįmanoma valdyti be orlaivio polinkio ir posvyrio kampų nustatymo, valdymo ir stabilizavimo prietaisų, sudarančių orlaivio atraminę koordinačių sistemą, kurios atžvilgiu būtų galima nustatyti polinkio ir posvyrio kampus. Netrikdoma skrydžio metu dirbtinė vietos vertikalė gaunama naudojant orlaivio padėties giroskopą ir jo pagrindu sudarytus prietaisus aviahorizontus ir girovertikales.

Padėties (vertikalo) giroskopas. Padėties giroskopo principas pagrįstas trijų laipsnių giroskopo savybe išlaikyti nepakitusią vietos vertikalės kinetinio momento kryptį erdvėje. 1.2.32 pav. pateikta schema, paaiškinanti polinkio ir posvyrio kampų nustatymo būdą, naudojant ***vertikalo*** giroskopą.

Padėties giroskopo kinetinio momento kryptis sutampa su vietos vertikale (ašis XX_1), kardaninės pakabos išorinio rėmo ašis sutampa su išilgine orlaivio ašimi ZZ_1, o pakabos vidinio rėmo ašis yra nukreipta pagal ašį YY_1, kuri yra horizontaliojoje plokštumoje.

Atsiradus ***polinkio*** kampui, pakabos išorinio rėmo ašis pasisuka kartu su orlaiviu, o giromazgas nekeičia savo krypties erdvėje (1.2.33 pav.). Todėl išorinio rėmo posūkio kampas kardaninės pakabos rotoriaus ašies atžvilgiu yra lygus orlaivio polinkio kampui.

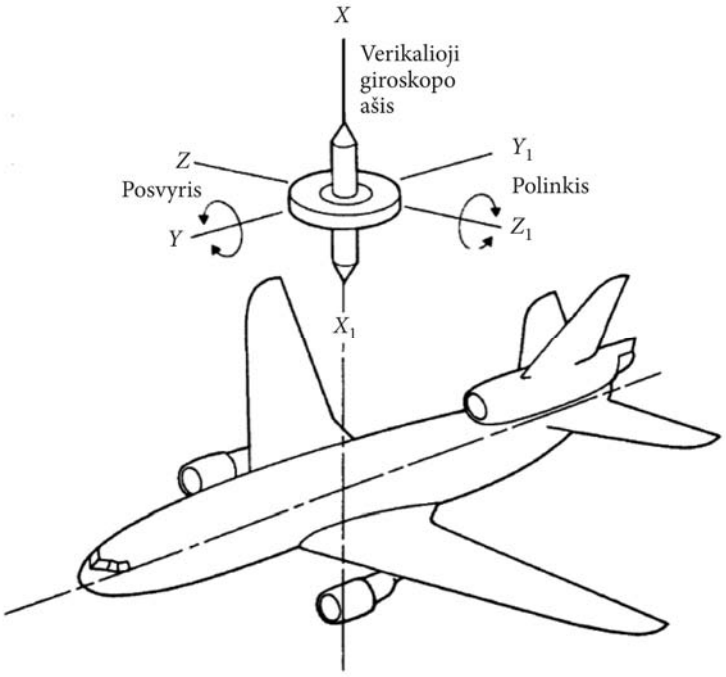
Kada orlaivis ***pasvyra***, kartu su orlaiviu pasisuka pagrindas, ant kurio pritvirtintas giroskopas. Išorinis rėmas šiuo atveju nejuda. Pagrindo posūkio kampas išorinio rėmo atžvilgiu lygus orlaivio posvyrio kampui.

Orlaivio polinkio ir posvyrio kampų atvaizdavimo padėties giroskopu pavyzdys pateiktas 1.2.33 pav.

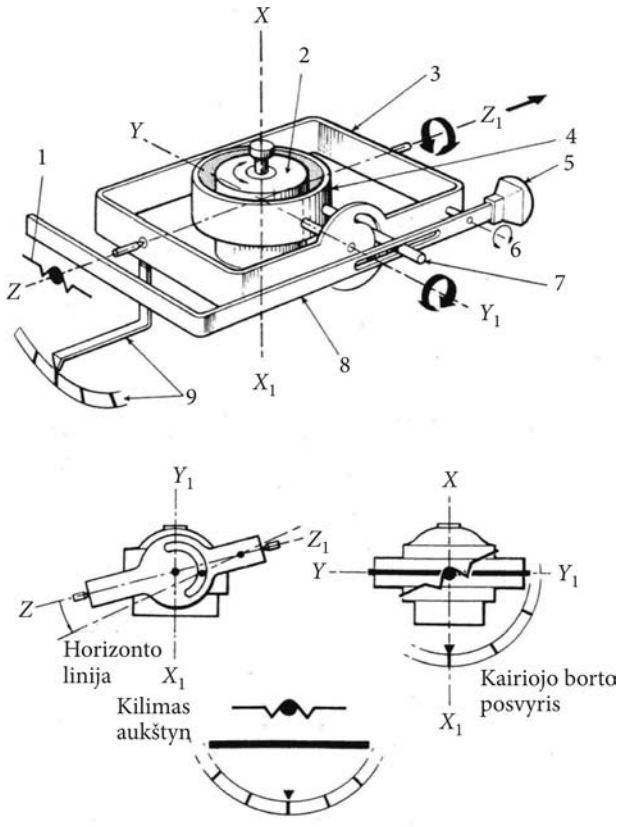
Atvaizduojant polinkio kampus, su pakabos išorinio rėmu susieta ***orlaivio siluetą*** imituojanti rodyklė *1*, priklausomai nuo giroskopo pakabos išorinio rėmo kampinės padėties (ašis YY_1), kyla arba leidžiasi ***horizonto linijos*** atžvilgiu pagal orlaivio polinkio kampo dydį ir „ženklą“. Horizonto liniją nurodo polinkio kampo rodiklio *8* priekyje esančio horizontaliojo rėmo padėtis (1.2.33 pav.).

Orlaivio posvyrio kampai atvaizduojami ***orlaivio siluetą*** imituojančios rodyklės *1* posūkiu į kairę arba dešinę jos centro atžvilgiu, priklausomai nuo orlaivio posvyrio kampo dydžio ir „ženklo“, pagal giroskopo pakabos išorinio rėmo ašies ZZ_1 posūkį. Posvyrio kampams nuskaityti gali būti nejudamoji skalė, susieta

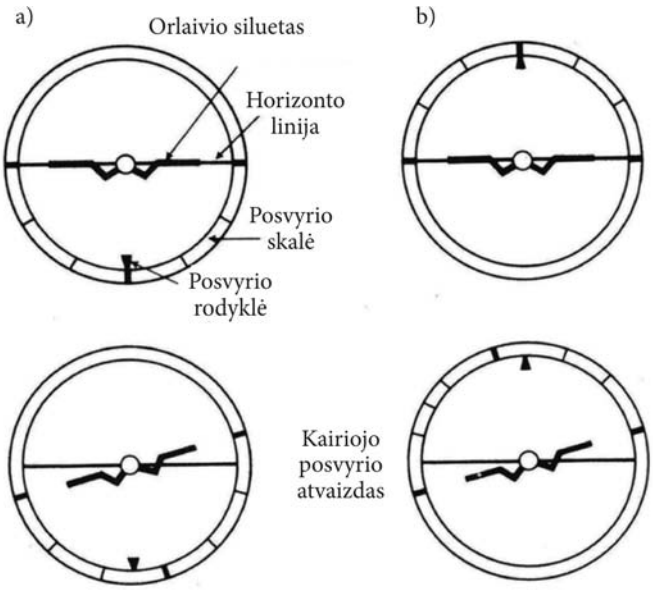
su ***horizonto linijos*** rėmu, ir jos atžvilgiu judanti rodyklė, susieta su giroskopo pakabos išorinio rėmo ašimi bei ***orlaivio siluetą*** imituojančia rodykle *1* (1.2.33 pav.). Priklausomai nuo padėties giroskopo indikatoriaus realizavimo, posvyrio kampams nustatyti gali būti naudojamos sukamos aplink ašį ZZ_1 skalės ir su horizonto linijos rėmu susieta nejudanti rodyklė, (1.2.34 pav.).



1.2.32 pav. Orlaivio atraminės koordinačių sistemos sudarymas padėties giroskopu

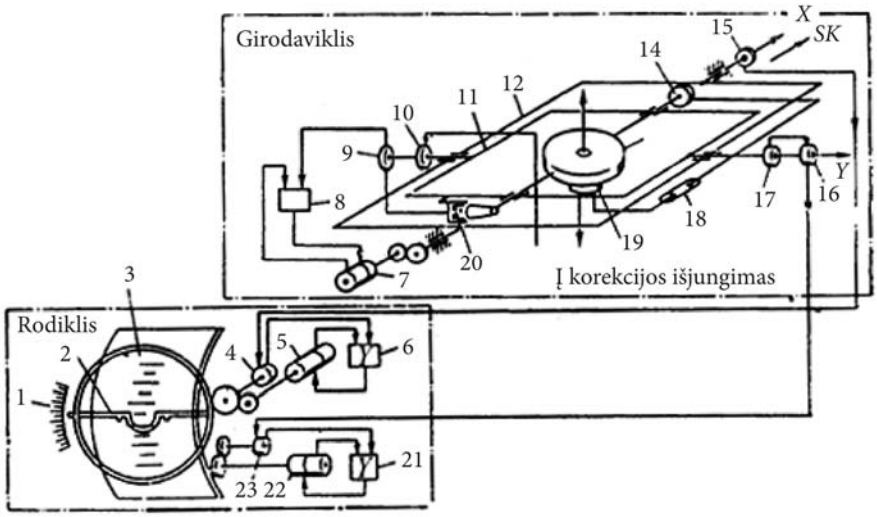


1.2.33 pav. Polinkio ir posvyrio kampų matavimo padėties giroskopu principinė schema: 1 – orlaivio siluetą imituojanti rodyklė; 2 – giroskopo rotorius; 3 – išorinis kardaninės pakabos rėmas; 4 – vidinis pakabos rėmas; 5 – atsvaras; 6 – polinkio kampo rodiklio posūkio ašis; 7 – polinkio kampo nuskaitymo ašis; 8 – polinkio kampo rodiklis; 9 – posvyrio kampo rodiklis



1.2.34 pav. Padėties giroskopo rodytuvas su viršutine (a) ir apatine (b) posvyrio skale

Aviahorizontas – tai prietaisas, skirtas pateikti įgulai vizualią informaciją apie orlaivio polinkio ir posvyrio kampus ir suformuoti orlaivio valdymo sistemai teikiamus šiuos kampus atitinkančius elektrinius signalus (1.2.35 pav.).



1.2.35 pav. Aviahorizonto kinetinė schema

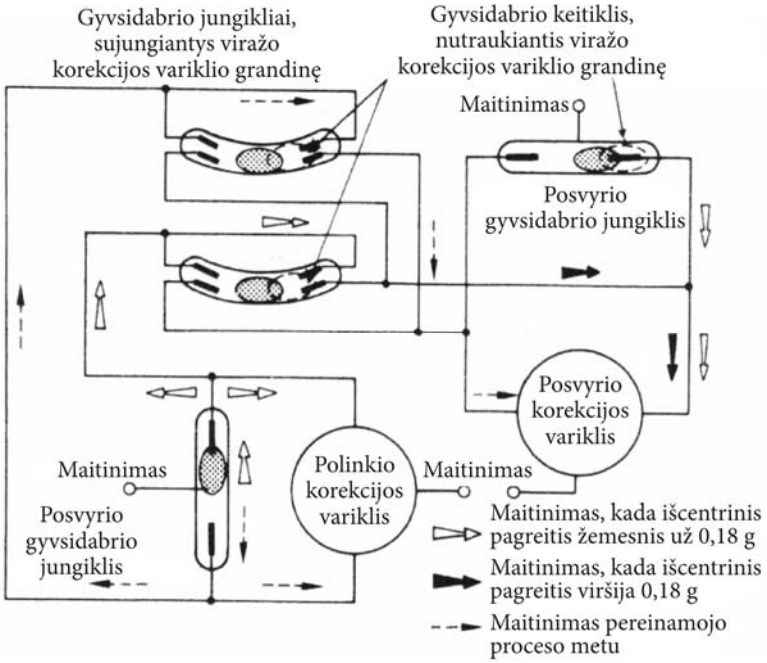
Pagal pateiktą 1.2.35 pav. tipinio aviahorizonto kinetinę schemą, prietaisą sudaro: giroskopinis daviklis (girodaviklis) bei polinkio ir posvyrio kampų rodiklis. Jo pagrindiniai mazgai: padėties giroskopas, švytuoklinė korekcijos sistema, sekimo rėmas, matavimo rezultatų nuskaitymo įtaisas ir aretyras.

Giroskopinio daviklio išorinio rėmo *11* ašis tvirtinama sekimo rėmo *12* guoliuose. Sekimo rėmas *12* skirtas palaikyti statmeną kinetinio momento ašį išorinio rėmo plokštumai, todėl prietaisas veikia neribotu posvyrio kampų diapazonu. Tai pasiekiama taip. Orlaiviui pasvirus, išorinis ir sekimo rėmai pasisuka kartu su orlaiviu. Indukcinio daviklio *20* statorius, pritvirtintas ant išorinio rėmo, pasisuka inkaro, pritvirtinto ant giromazgo ašies. Nuo indukcinio daviklio išėjimo nuskaitomas signalas, kuris per komutatorių *9* ir stiprintuvą *8* patenka į variklį-generatorių *7*. Šis variklis per reduktorių pasuka sekimo ir išorinį rėmą į horizontaliąją padėtį, kuriai esant, indukcinio daviklio *20* signalas tampa lygus nuliui.

Dėl pereinamųjų procesų atsirandantiems sekimo rėmo virpesiams slopinti naudojamas greitas grįžtamasis ryšys, kuris atliekamas įvedant signalą iš generatoriaus *7* į stiprintuvą *8*. Esant polinkio kampams

90° ir 270°, komutatorius *9* valdomo signalo fazės perjungimu keičia variklio-generatoriaus *7* sukimosi kryptį.

Vertikalioji korekcija aviahorizonte atliekama naudojant gulsčiukinę korekcijos sistemą su dviejų koordinačių korekcijos gulsčiukiniu skystiniu davikliu *19*. Vykdomieji elementai – kintamosios srovės koreguojantieji varikliai *10* ir *14*. Skersinės korekcijos variklio grandinėje įjungti korekcijos išjungiklio kontaktai. Korekcijos išjungiklis išjungia korekciją orlaiviui sukantis ilgiau negu 7–10 s kampiniu greičiu, didesniu nei 0,1–0,3° per sekundę. Esant orlaivio pagreičiams, didesniems nei 1,76 m/s^2, išjungiama išilginė korekcija. Išjungimą atlieka į išilginės korekcijos grandinę nuosekliai įjungtas išjungiklis *18*. Tai hermetizuotas indas su dviem kontaktais ir elektrai laidžiu skysčiu (arba gyvsidabriu) tarp jų. Kada atsiranda teigiamasis arba neigiamasis išilginis pagreitis, skystis pasislenka ir apnuogina vieną iš kontaktų, tada korekcijos grandinė nutrūksta (1.2.36 pav.).



1.2.36 pav. Aviahorizonto korekcijos išjungiklių schema

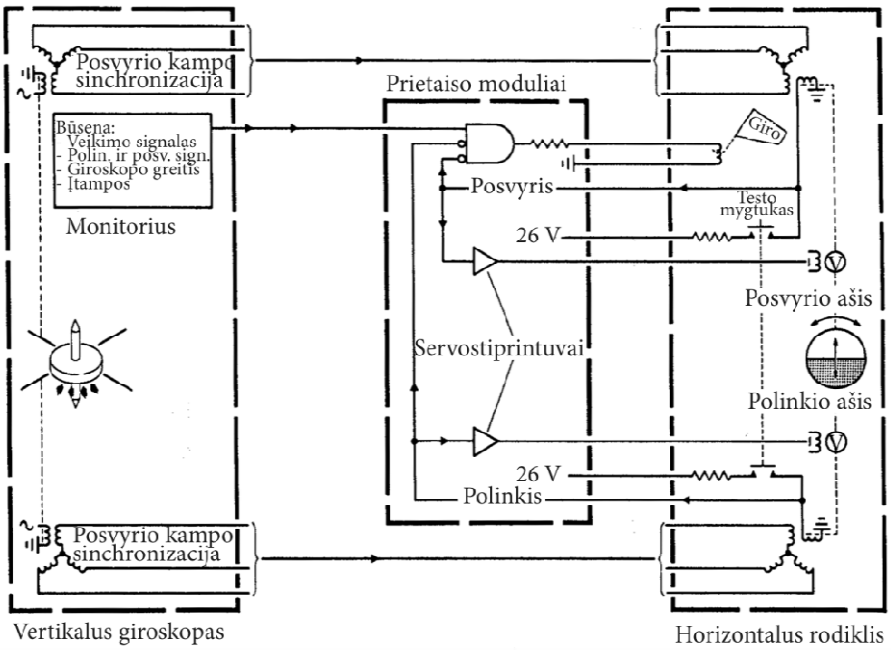
Proporcingi matuojamiems kampams signalai tiekiami selsinais-davikliais *15, 17*. Greitai sugrąžinti prietaisą į normalią padėtį padeda jame esantis elektromechaninis aretyras. Atliekant aretyravimą, sekimo rėmo plokštuma nustatoma lygiagrečiai, o giroskopo ašis – statmenai prietaiso pagrindui.

Aviahorizonto girodaviklis su matuojamųjų kampų rodikliu susietas nuotoline sinchronine selsinine pavara (1.2.37 pav.).

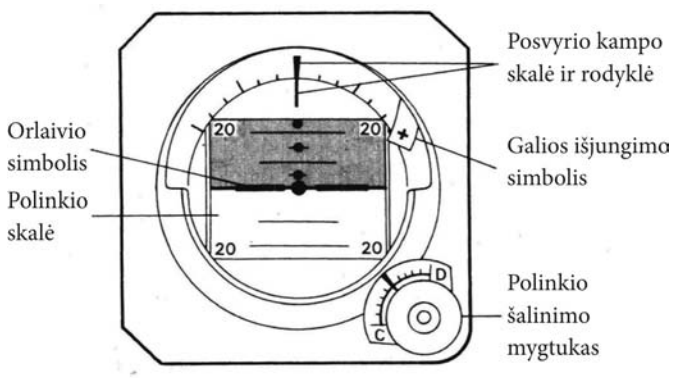
Posvyrio kampo signalas, perduotas selsinu-davikliu *15* rodiklio selsinui-ėmikliui *4* po sustiprinimo stiprintuve *6* patenka į variklį-generatorių *5*. Veikiamas šio signalo variklis *5* per reduktorių pasuka krumpliaratį su orlaivio silueto rodykle *2*. Posvyrio kampas nustatomas pagal skalę *1* ant prietaiso korpuso (1.2.38 pav.)

Polinkio kampo signalas, perduotas selinu-davikliu *17* į selsiną-ėmiklį *23* per komutatorių *16,* po sustiprinimo stiprintuvu *21* patenka į variklį-generatorių *22*, kuris per reduktorių perstumia ritę *3* su polinkio kampo skale. Polinkio kampas nustatomas pagal skalę ir orlaivio silueto rodyklę *2*. Kadangi tarp giroskopinio daviklio ir aviahorizonto rodiklio yra nuotolinis sinchroninis ryšys, tai rodiklis gali būti kabinos prietaisų skyde, o giroskopinis daviklis arti orlaivio masių centro. Toks giroskopinio daviklio išdėstymas leidžia didinti jo tikslumą, kadangi arti orlaivio masės centro esantį giroskopinį daviklį mažiau veikia pagreičiai, atsirandantys orlaiviui judant masių centro atžvilgiu.

Aviahorizonto rodmenų pavyzdžiai, kai orlaivis leidžiasi ir kyla bei atlieka sudėtingesnes kampines evoliucijas, pateikti 1.2.39 pav.



1.2.37 pav. Apibendrinta aviahorizonto duomenų sinchroninio perdavimo į rodiklį schema

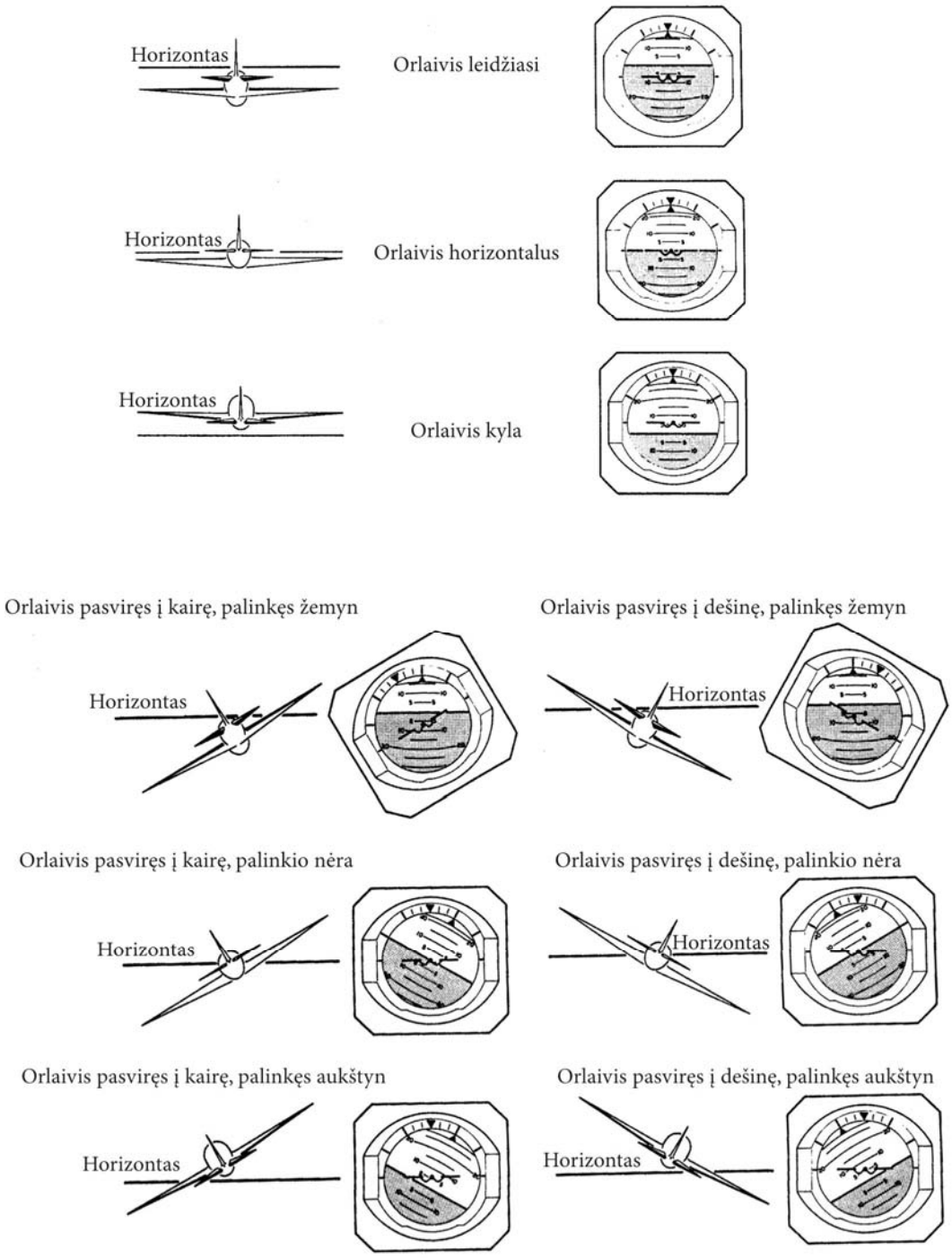


1.2.38 pav. Aviahorizonto rodiklis

Aviahorizonto su rotoriaus sukimo vakuumine pavara tipinės konstrukcijos pavyzdys pateiktas 1.2.40 pav.

Giromotoro rotoriaus šerdis ir švytuoklinis – rutulinis vertikaliosios krypties korektorius (1.2.26 pav.) sudaro aviahorizonto vidinio rėmo žiedą *2*, kuris gali sukinėtis stačiakampės formos išorinio rėmo žiedo *8* ašies atžvilgiu. Rotoriaus apatinis guolis įtaisytas išorinio rėmo angos apačioje, o viršutinis guolis įtvirtinamas korpuso stove taip, kad galėtų vertikaliąja kryptimi šiek tiek spyruokliuoti. Taip, kintant temperatūrai, atliekamas rotoriaus ašies ilgio diferencinių pokyčių įtakos jo sukimosi greičiui kompensavimas.

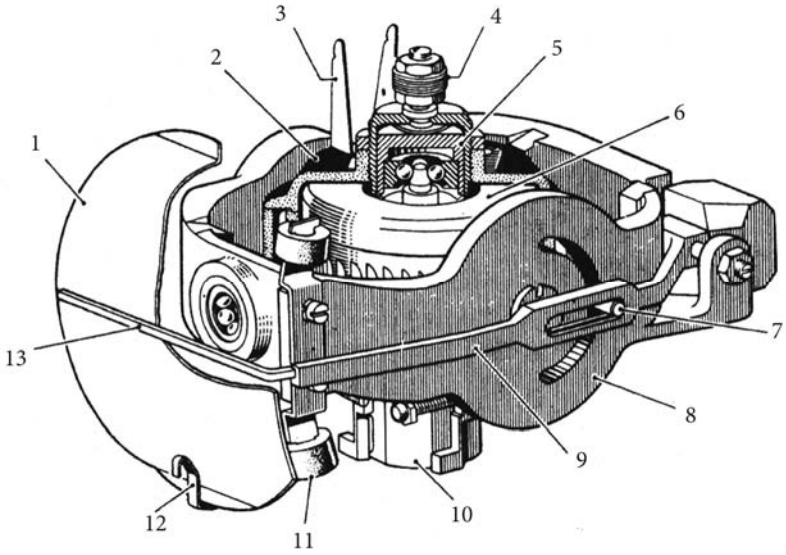
Pritvirtinta prietaiso priekyje tamsaus fono plokštė *1*, simbolizuojanti supančią orlaivį erdvę ir išorinis rėmas su posvyrio rodykle, prieš ją esančioje posvyrio kampo skalėje fiksuoja esamą orlaivio posvyrio kampą. Išorinis rėmas *8* gali laisvai pasisukti aplink savo ašį 360°, tačiau hidraulinis slopintuvas apriboja polinkio judesį ±85° pagal rotoriaus korpuso dydį. Polinkio kampinės padėties pokyčiai atvaizduojami atitinkamai kečiant atstumą tarp horizonto ir orlaivio silueto rodiklių (1.2.33 pav.) „erdvės plokštės“ fone.



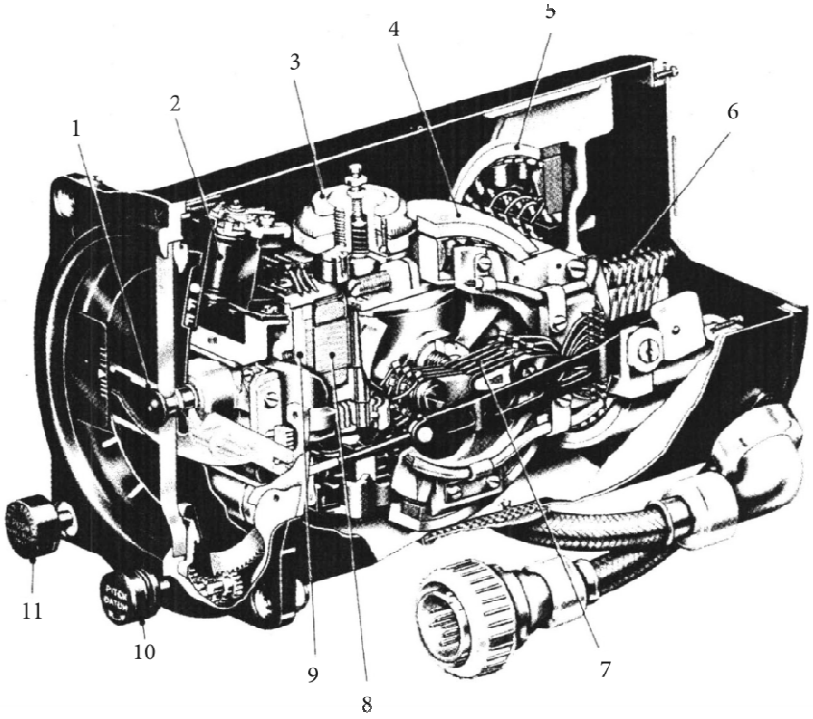
1.2.39 pav. Aviahorizonto rodmenų pavyzdžiai, orlaivio skrydžio metu kintant polinkio ir posvyrio kampams

Vakuuminė rotoriaus sukimo pavara, naudojanti išorinę pneumatinę varomąją sistemą (1.2.12 pav.), sukelia stabilų aviahorizonto rotoriaus sukimąsi 15 tūkst. sūkių per minutę greičiu. Praėjęs pro besisukantį rotorių oro srautas valdo rotoriaus apatinėje dalyje (1.2.25 pav.) įtaisytą ašies vertikalės nuokrypių aerodinaminį-švytuoklinį korektorių *10*.

Elektrinio aviahorizonto tipinės konstrukcijos pavyzdys pateiktas 1.2.41 pav. Pagrindinis šio tipo aviahorizonto skirtumas, palyginti su nagrinėtuoju, yra tas, kad jame naudojamas trijų fazių elektrinis giromotoras, kurio sandara ir funkcionavimas nuodugniai aprašyti 1.2.1 poskyriuje.



1.2.40 pav. Aviahorizontas su vakuumine pavara: 1 – erdvės vaizduoklis; 2 – vidinio rėmo žiedas; 3 – hidraulinis slopintuvas; 4 – balansavimo mova; 5 – termokompensatorius; 6 – rotorius; 7 – polinkio kampo pavaros ašis; 8 – išorinio rėmo žiedas; 9 – polinkio kampo pavaros rankenos petys; 10 – švytuoklinio aerodinaminio kompensatoriaus mazgas; 12 – posvyrio rodyklė; 13 – horizonto rodyklė



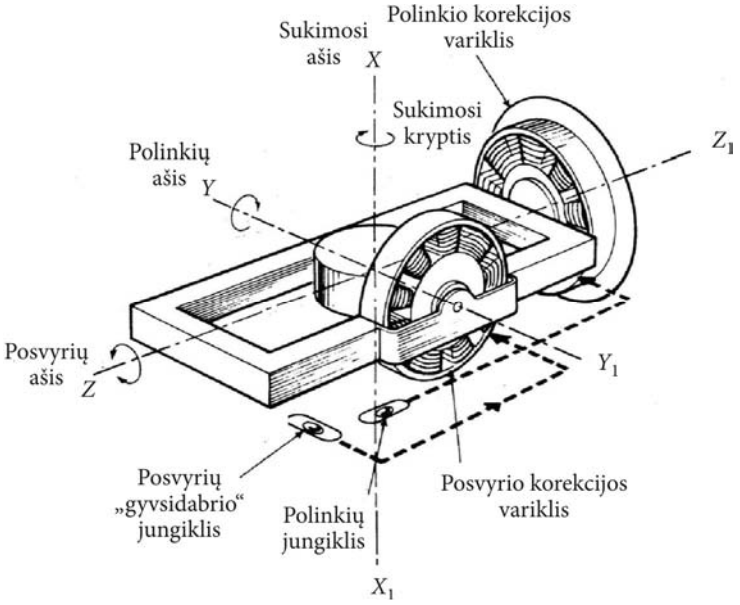
1.2.41 pav. Elektrinio aviahorizonto konstrukcijos pavyzdys: 1 – miniatiūrinis orlaivis; 2 – energijos sutrikimų indikacijos mazgas; 3 – giromazgas; 4 – posvyrio korekcijos variklis; 5 – polinkio korekcijos variklis; 6 – kontaktų slydimo žiedo mazgas; 7 – kardaninės pakabos kontaktų mazgas; 8 – statorius; 9 – rotorius; 10 – polinkio balansavimo rankenėlė; 11 – greitos korekcijos jungiklis (aretyras)

Priminsime vieną iš esminių reikalavimų giroskopui – jo rotorius turi būti pakankamai masyvus, o jo masė išsidėsčiusi toliau nuo sukimosi ašies, kad sukeltų maksimalų sukimosi inercijos momentą.

Kaip buvo paaiškinta 1.2.41 pav. poskyryje, elektrinis giroskopas sudaromas taip, kad jo elektrinio variklio rotorius yra nejudamas, o aplink jį sukasi masyvus variklio statorius. Taigi elektriniame girohorizonte sudaromos palankesnės sąlygos didesniam giroskopo sukimosi greičiui, stabilumui ir matavimų tikslumui pasiekti. Elektrinis giromotoras, maitinamas trifaze 115 V kintamąja 400 Hz elektros srove, sukasi apie 20–23 tūkst. sūkių per minutę greičiu. Energijos tiekimas giromotorui stebimas jo rodiklyje (1.2.38 pav.) esančiu galios išjungimo simboliu.

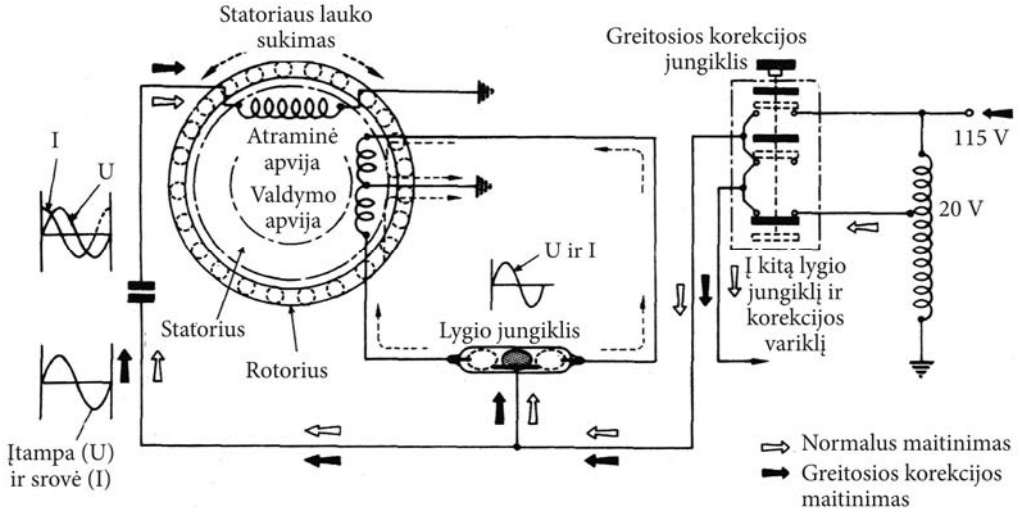
Prietaisas turi dviejų krypčių ašies korekcijos sistemą su polinkio ir posvyrio korekcijos varikliais (1.2.42 pav.). Ši sistema naudojama daugelyje elektrinių aviahorizontų ir sudaryta iš dviejų korekcijos variklių, atskirai valdomų tam tikrais gyvsidabriniais lygio jungikliais.

Gyvsidabrinis lygio jungiklis – tai hermetiškas, pripildytas inertinių dujų stiklinis vamzdelis, kuriame yra gyvsidabrio lašas. Jei vamzdelis yra horizontalioje padėtyje jo išilginės ašies atžvilgiu, gyvsidabrio lašas yra vamzdelio centre. Palenkus vamzdelį į vieną ar kitą pusę jo išilginės ašies kryptimi, gyvsidabrio lašas vamzdelyje nuteka į palenktą vamzdelio pusę ir sujungia vamzdelio gale bei centre įtaisytus metalinius kontaktus, per kuriuos valdomas korekcijos variklis. Gyvsidabriniai lygio jungikliai tvirtinami vienas lygiagrečiai su polinkio (išilgine orlaivio) ašimi, kitas lygiagrečiai su posvyrio (skersine orlaivio) ašimi (1.2.42 pav.). Pirmasis sujungtas su posvyrio korekcijos varikliu, o antrasis – su polinkio korekcijos varikliu. Polinkio korekcijos variklio rotorius susietas su užpakaline korpuso dalimi, o statorius – su išoriniu giroskopo rėmu. Posvyrio korekcijos variklio rotorius susietas su išoriniu giroskopo rėmu, o statorius – su giroskopo korpusu.



1.2.42 pav. Koreguojančiųjų variklių ir lygio korekcijos jungiklių montavimo schema

Korekcijos varikliai turi koncentriškai statoriui sumontuotą „voverės narvo“ pavidalo sluoksniuotosios geležies rotorių. Ant rotoriaus stipino pavidalo šerdžių yra dvi apvijos – viena sudaro pastovųjį „atraminį“ elektromagnetinį lauką, o antroji – tai valdymo apvija, sukelianti variklį valdantį kintamąjį lauką.



1.2.43 pav. Korekcijos variklio ir lygio jungiklio sujungimo principinė schema

Abi apvijos maitinamos iš reguliuojamojo autotransformatoriaus, yra prijungtos tarp A ir B fazių, kintamosios trifazės 115 V įtampos, tiekiamos į aviahorizontą (1.2.43 pav.). Kada giroskopas veikia sklandžiai ir normalioje valdymo padėtyje, lygio jungiklių gyvsidabrio lašas yra vamzdelio centre ir kontaktuoja tik su centre esančiu elektrodu. Du kraštiniai jungiklio elektrodai, per kuriuos prijungiamos korekcijos variklių valdymo apvijos, neturi elektrinio kontakto su centriniu elektrodu ir variklio statorius išlieka laisvas. Iš autotransformatoriaus maitinamojoje grandinėje: (centrinis jungiklio elektrodas – korekcijos variklio atraminė apvija) nustatoma sumažinta įtampa (paprastai – 20,0 V). Esant normaliai giroskopo padėčiai, šioje grandinėje srovė teka tik per variklio atraminę apviją (1.2.43 pav.).

Tarkime, kad įvyko giroskopo nuokrypis polinkio kampo ašies YY_1 atžvilgiu. Tokiu atveju lygiagretus išilginei ašiai ZZ_1 polinkio lygio jungiklis irgi pakryps, o jame esantis gyvsidabris sujungs centrinį ir pokrypio pusėje esantį elektrodus. Susijungs maitinimo grandinė, aprūpinanti srove vieną iš dviejų korekcijos variklio valdymo apvijos dalių. Tekanti valdymo apvijos dalyje srovė sukels variklio statoriaus apvijoje tam tikros krypties elektromagnetinį lauką, dėl kurio įtakos sužadinamas koreguojantysis priešingos krypties sukimo momentas nejudamojo variklio rotoriaus atžvilgiu. Sujungtas su giroskopo rėmų koreguojančiuoju varikliu statorius pasisuks priešinga nuokrypiui linkme ir ištaisys įvykusį giroskopo nuokrypį.

Tam, kad koreguojančiojo variklio statorius pasisuktų, reikia, kad tarp variklio atraminės ir valdymo apvijų sukeliamų elektromagnetinių laukų būtų 90° fazės poslinkis. Šis poslinkis 1.2.43 pav. pateiktoje schemoje pasiekiamas, įjungiant į atraminės apvijos grandinę kondensatorių, sukeliantį tekančios srovės *I* atžvilgiu įtampos *U* fazės poslinkį 90°.

Jei giroskopo polinkis būtų priešingos krypties, lygio jungiklis sujungtų su maitinimo transformatoriumi kitą valdymo apvijos dalį, kurioje srovė teka priešinga kryptimi (su 180° skirtinga faze) (1.2.43 pav.), todėl ir šiuo atveju tarp valdymo ir atraminio elektromagnetinių laukų išliktų 90° fazinis poslinkis, tik su priešingu fazių skirtumo ženklu. Tai reiškia, kad antruoju atveju korekcijos variklio statorius pasisuktų rotoriaus atžvilgiu į priešingą pusę, kad būtų galima atlikti giroskopo korekciją.

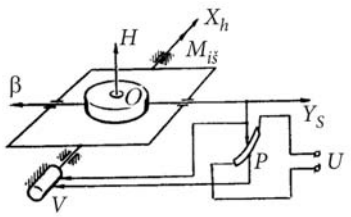
Aprašytoji elektrinio aviahorizonto giroskopo vertikaliosios padėties korekcijos sistema, naudojanti korekcijos variklius ir lygio jungiklius, pradeda koreguoti giroskopo vertikalę, kai nuokrypiai tampa didesni negu 10°. Vertinant koregavimo sistemos inertiškumą ir galimus atvejus, kai prietaisui pradėjus veikti atsiradę giroskopo nuokrypiai, esant dideliems orlaivio evoliucijų pagreičiams, gali tapti pernelyg dideli, koregavimo sistemoje numatytas greitosios korekcijos režimo įjungimas.

Greitosios korekcijos režimas įjungiamas jungikliu (1.2.43 pav.), perjungiančiu maitinantį autotransformatorių į padėtį, kurioje korekcijos variklių valdymo įtampa padidėja nuo 20 V iki 115 V kiekvienoje fazėje. Toks maitinimo įtampos pakeitimas greitosios korekcijos režime leidžia padidinti korekcijos operatyvumą nuo 5° per minutę iki 120° ir 180° per minutę. Tokiu režimu giroskopo vertikalės koregavimo laikas neviršija 15 s.

1.2.4. Girovertikalė (kardaninė platforma)

Nuolat didėjantys reikalavimai orlaivio valdymo tikslumui pagal posvyrio ir polinkio kampus neleidžia daugeliu atvejų naudoti šių kampų davikliais anksčiau nagrinėtų aviahorizontų dėl jų nepakankamo tikslumo. Aviahorizontų tikslumą mažina esminės inercinės apkrovos, trintis bei vidinio ir išorinio rėmų ašių nesuderinamumas (disbalansas).

Tikslumui didinti, esant didelėms rėmų ašių apkrovimams, naudojamas jėgos (jėginės) giroskopinės stabilizacijos principas. Šio principo esmę galima paaiškinti remiantis vienos ašies jėgos giroskopinio stabilizatoriaus pavyzdžiu (1.2.44 pav.).



1.2.44 pav. Vienos ašies jėgos giroskopinio stabilizatoriaus principinė schema

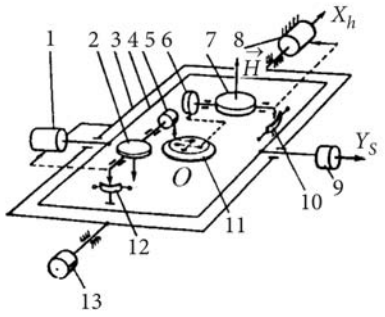
Tegul trijų laipsnių giroskope pagal išorinio rėmo pakabos ašį (OX_n) veikia išorinis momentas $M_{iš}$. Veikiamas išorinio momento giroskopas atlieka precesinį judesį aplink vidinio rėmo pakabos ašį Y_S kampiniu greičiu $\beta = -M_{iš}/H$. Precesinis judesys sukelia giroskopinį momentą M_g, nukreiptą priešingai pagal dydį, lygų momentui $M_{iš}$. Giroskopinis momentas kompensuoja išorinį momentą, ir išorinis rėmas išsaugo savo pirminę padėtį. Tačiau, pasukus giroskopą 90° kampu, kinetinio momento ašis sutaps su išorinio rėmo pakabos ašimi, ir giroskopas praras stabilumą – veikiamas momento $M_{iš}$, pradės suktis ašies OX_S atžvilgiu. Kad to neįvyktų, naudojama sistema, į kurią įeina potenciometras *P* ir variklis *V*. Potenciometro šliaužiklis pritvirtintas prie vidinio rėmo sukimosi ašies, o pats potenciometras – ant išorinio rėmo. Variklio *V* rotoriaus sukimosi ašis standžiai susieta su išorinio rėmo sukimosi ašimi. Pasisukus vidiniam rėmui (veikiant momentui $M_{iš}$), nuo potenciometro *P* į variklį *V* perduodamas signalas. Variklis sukelia ašies OX_n atžvilgiu stabilizacijos momentą M_S, nukreiptą priešingai išoriniam momentui $M_{iš}$. Veikiamas stabilizacijos momento M_s, giroskopas pradeda precesiją vidinio rėmo ašies atžvilgiu atbuline kryptimi ir sustoja padėtyje, kai stabilizacijos momentas M_S susilygina su išoriniu momentu $M_{iš}$.

Tokio giroskopinio stabilizatoriaus pagrindinės ašies virpesių amplitudė, judant pagrindui pagrindinės ašies OX_S atžvilgiu, bus daug mažesnė negu paprasto nestabilizuoto giroskopo analogiškų virpesių amplitudė. Ši aplinkybė leidžia gauti didesnį pokrypio ir polinkio kampų nustatymo tikslumą, naudojant kampų davikliais jėgos giroskopinius stabilizatorius.

Vienos ašies giroskopiniame stabilizatoriuje stabilizuojantysis variklis kompensuoja tik tuos jėgos momentus, kurie veikia išilgai rėmo stabilizacijos ašies. Išilgai ašies OY_S, veikiantys momentai sukels išorinio rėmo nukrypimą nuo jo pirminės padėties. Be to, rėmas gali keisti savo padėtį dėl Žemės sukimosi ir orlaivio judėjimo Žemės atžvilgiu. Norint išlaikyti pasirinktos padėties giroskopą Žemės atžvilgiu, naudojamos korekcijos sistemos, analogiškos toms, kurios yra aviahorizontuose. Sudarant dirbtinę horizonto plokštumą, naudojami prietaisai, jungiantys du vienos ašies jėgos giroskopinius stabilizatorius.

Centrinė girovertikalė – tai giroskopinis daviklis, aprūpinantis orlaivio vartotojus (valdymo sistemą, kurso sistemą, radiolokatorių ir kt.) polinkio ir pokrypio kampų reikšmių signalais. Yra nemažai modifikacijų, realizuojančių tokius daviklius, tačiau visų veikimo principas iš esmės yra analogiškas ir gali būti aiškinamas naudojant 1.2.45 pav. pateiktą schemą.

Centrinė girovertikalė – tai platforma su dviejų ašių jėgos giroskopiniu stabilizavimu. Platforma *4* pakabinta rėme *3*. Ant platformos *4* yra du dviejų laipsnių giroskopai *2, 7*, kurių kinetinių momentų ašys nukreiptos statmenai platformos plokštumai ir į priešingas puses. Signalai, proporcingi giromazgų posūkio kampams platformos atžvilgiu, nuimami nuo potenciometrų *10*, *12*. Potenciometrų įtampos patenka į stabilizuojančiuosius variklius *1, 8*. Potenciometrai *10, 12* ir varikliai *1, 8* sudaro jėgos stabilizavimo sistemą, iš esmės mažinančią išorinių momentų, veikiančių per pakabos ašis, įtaką platformos horizontalumo tikslumui.



1.2.45 pav. Centrinės girovertikalės principinė schema

Veikiant išoriniam momentui pagal ašį OX_n, giroskopas *7* atlieka precesinį judesį, ir signalas iš potenciometro *10* patenka į stabilizuojantįjį variklį *8*, kuris sukelia stabilizacijos momentą, kompensuojantį išorinio poveikio momentą. Jei išorinis momentas veikia pagal ašį OY_n, precesinį judesį atlieka giroskopas *2*.

Kaip rezultatas atsiranda signalas iš potenciometro *12*, ir variklis *1* sukelia momentą, kompensuojantį ir šį išorinį momentą.

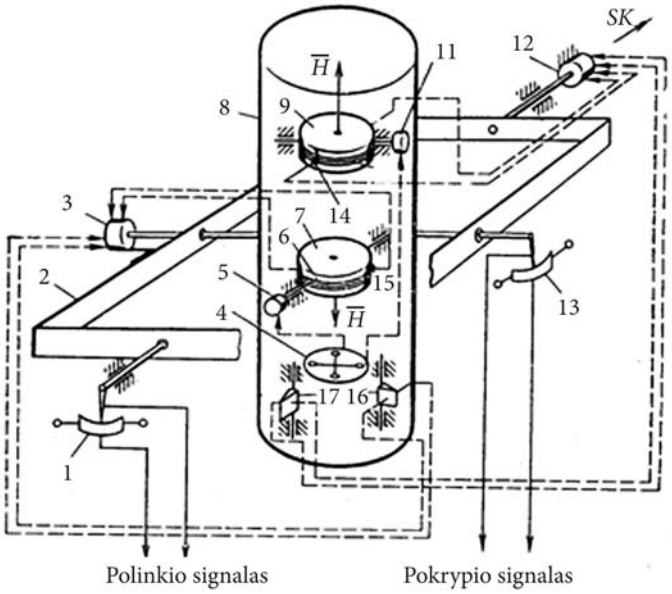
Platformos korekciją pagal vertikalę atlieka sistema, sudaryta iš dviejų koordinačių skystinės švytuoklės *11* ir koreguojančiųjų variklių *5, 6*. Platformai nukrypstant nuo horizonto plokštumos ašies OX_n atžvilgiu švytuoklės *11* signalas patenka į koreguojantį variklį *6*. Variklis *6* sukelia momentą giroskopo *7* pakabos ašies atžvilgiu. Tai inicijuoja platformos precesinį judesį kryptimi, šalinančia jos nukrypimą nuo horizonto plokštumos. Platformos nukrypimas nuo horizonto plokštumos ašies OY_S atžvilgiu formuoja signalą, perduodamą iš gulsčiukinio korektoriaus į koreguojantįjį variklį *5*. Šis variklis *5* sukelia momentą giroskopo *2* pakabos ašies atžvilgiu ir tam tikrą platformos precesinį judesį, šalinantį jos nuokrypį nuo horizonto plokštumos. Signalai, proporcingi pokrypio ir polinkio kampams, nuimami nuo daviklių *9* ir *13*.

Tipinė elektrinė-kinetinė centrinės girovertikalės schema pateikta 1.2.46 pav. Giroskopiškai stabilizuota platforma *8* atlikta cilindrinio gaubto pavidalu, kuriame vienas virš kito yra du giromazgai *7* ir *9*. Platformos ašis įtvirtinta išorinio rėmo *2* guoliuose. Darbinėje padėtyje ji horizontali ir nukreipta sparnų kryptimi. Išorinio rėmo ašis įtvirtinta prietaiso korpuso guoliuose ir nukreipta lygiagrečiai su orlaivio išilgine ašimi. Taigi prietaiso korpuso posūkio kampas išorinio rėmo atžvilgiu atitinka orlaivio pokrypio kampą, o išorinio rėmo posūkio kampas platformos ašies atžvilgiu – orlaivio polinkio kampą.

Centrinė girovertikalė jungia tris sistemas: jėgos stabilizavimo sistemą, sudarytą iš potenciometrų *6, 10* ir stabilizuojančiųjų variklių *3, 12*, korekcijos sistemą, sudarytą iš skystinio švytuoklinio korektoriaus *4* ir koreguojančiųjų variklių *5, 11* bei vertikalės nustatymo sistemą, sudarytą iš švytuoklių *16, 17* ir stabilizuojančiųjų variklių *3, 12*.

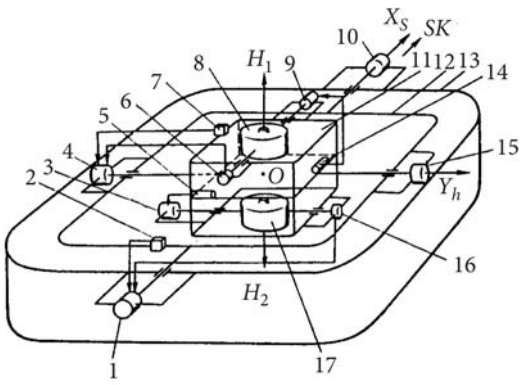
Signalai nuo vielinių potenciometrų, apvyniotų ant giromazgų korpusų, fiksuojami šliaužikliais *14, 15*. Korekcijos ir jėgos stabilizavimo sistemų veikimo principai analogiški nagrinėtiesiems.

Panagrinėsime centrinės girovertikalės greito orientavimo sistemą pagal vietos vertikalę. Centrinė girovertikalė neturi aretyravimo įtaiso ir todėl, įjungus prietaiso maitinimą, kardaninės pakabos rėmai užima bet kokią padėtį. Kai platforma nukrypsta nuo horizonto plokštumos kampu, didesniu nei 2°, pavyzdžiui, pagal išorinio rėmo pakabos ašį švytuoklėje *17* susijungia centrinis jos kontaktas su vienu iš kraštinių. Švytuoklės įtampa perduodama į stabilizuojantįjį variklį *12*. Ši įtampa viršija potenciometro *10* įtampą, todėl variklis įsijungia. Veikiant momentui, kurį sukelia variklis *12*, giroskopas *9* atlieka precesinį judesį iki atramų. Kada giroskopas atsiremia į atramas, variklio *12* momentas suka platformą aplink išorinio rėmo pakabos ašį iki švytuoklės *17* kontaktų atsijungimo. Po švytuoklės *17* kontaktų atsijungimo platforma į vertikaliąją padėtį pastatoma korekcijos sistema, kurios JE yra skystinė švytuoklė *4*. Analogiškai veikia korekcijos sistema pagal platformos pakabos ašį, į kurią įeina švytuoklė *16* ir variklis *3*. Pokrypio ir polinkio kampų signalai perduodami potenciometrais *1, 13*.



1.2.46 pav. Centrinės girovertikalės elektrinė-kinetinė schema

Praktiškai paplitusios ***mažų gabaritų*** girovertikalės (1.2.47 pav.) atliekamos, kaip dviejų ašių giroskopiškai stabilizuota platforma *11*, pakabinta rėme *12*, kuris pakabintas prietaiso korpuse *13*. Ant platformos yra du dviejų laipsnių giroskopai *8, 17,* kurių kinetinių momentų ašys nukreiptos statmenai platformos plokštumai ir priešingai viena kitai. Signalai, proporcingi giromazgų posūkio kampams platformos atžvilgiu, perduodami potenciometrais *6, 16*.



1.2.47 pav. Mažų gabaritų girovertikalės kinetinė schema

Potenciometrų įtampa patenka į stabilizuojančiuosius variklius *1, 4*. Potenciometrai *6, 16* ir varikliai *1, 4* sudaro jėgos stabilizavimo sistemą, mažinančią išorinių momentų, veikiančių išilgai pakabos ašių, įtaką platformos palaikymo horizonto plokštumoje tikslumui. Veikiant išoriniam momentui ašies OX_p atžvilgiu, giroskopas *17* atlieka precesiją, ir signalas nuo potenciometro *16* patenka į stabilizuojamąjį variklį, kuris sukelia stabilizacijos momentą, kompensuojantį išorinį momentą. Jei išorinis momentas veikia ašies OY_n atžvilgiu, giroskopas *8* atlieka precesinį judesį, ir nuo potenciometro *6* signalas perduodamas į variklį *4,* kuris sukelia momentą, kompensuojantį išorinį momentą.

Platformos padėtis horizonto plokštumoje palaikoma korekcijos sistema, turinčia du vieno kanalo skystinius švytuoklės tipo daviklius *5, 14* ir koreguojančiuosius variklius *3, 9*. Nukrypstant platformai nuo horizonto plokštumos ašies OX_p atžvilgiu, daviklio *5* signalas patenka į koreguojantįjį variklį *3*. Šis variklis *3* sukelia momentą giroskopo *17* pakabos atžvilgiu ir suka platformą *11* bei rėmą *12* kryptimi, mažinančia jos nesutapimą su horizonto plokštuma. Nukrypstant platformai nuo horizonto ašies OY_n atžvilgiu, atsiranda daviklio *14* signalas, kuris perduodamas į koreguojantįjį variklį *9*. Šis variklis *9* sukelia jėgos momentą giroskopo *8* pakabos ašies atžvilgiu, dėl ko platforma sukama ašies OY_n atžvilgiu kryptimi, mažinančia jos nuokrypį nuo horizonto plokštumos.

Mechaninės švytuoklės *2, 7,* turinčios jautrumo ribą 2°, kartu su stabilizuojančiais varikliais *1* ir *4* sudaro platformos greito orientavimo pagal horizonto plokštumą sistemą, kuri pradeda veikti įjungus prietaisą.

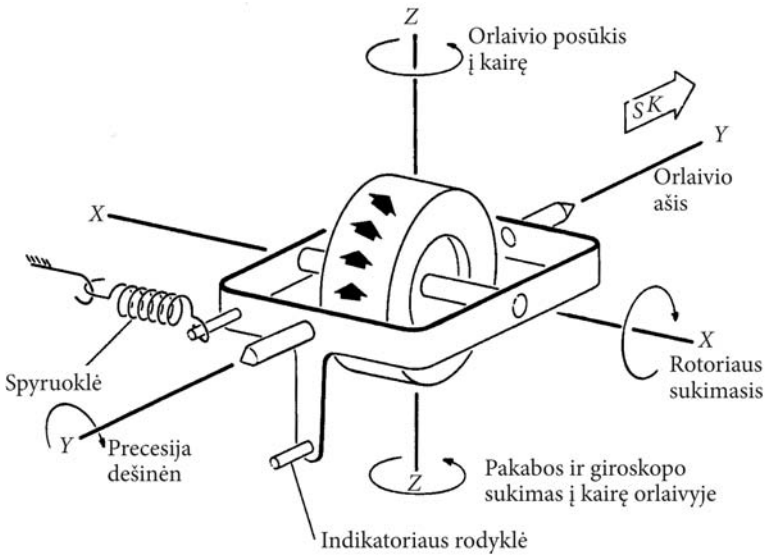
Signalai, proporcingi polinkio ir pokrypio kampams, gaunami nuo išėjimo keitiklių *10, 15,* jungiančių potenciometrinius daviklius ir sinusinius-kosinusinius transformatorius.

1.2.5. Posūkio ir viražo indikatorius (tempo giroskopas)

Kampinių greičių davikliai skirti orlaivių sukimosi kampinių greičių aplink susietas ašis krypčiai ir dydžiui nustatyti. Orlaivių valdymo sistemose kampiniams greičiams matuoti naudojami tempo (slopinantieji) giroskopai ir jų pagrindu sudaryti, kitų giroskopinių prietaisų korekcijos išjungikliai.

Tempo giroskopai matuoja kampinius greičius orlaivių sukimosi ašių atžvilgiu ir perduoda proporcingus šiems greičiams elektrinius signalus į skrydžio valdymo sistemą. Tai leidžia gerinti pereinamųjų procesų kokybę valdymo koordinatės atžvilgiu.

Pagrindinis tempo giroskopo elementas yra dviejų laipsnių giroskopas, kuris orientuojamas orlaivyje, kaip tai parodyta 1.2.48 pav. Pagrindinė giroskopo ašis *XX* yra lygiagreti su orlaivio skersine ašimi, o rėmo ašis *YY* lygiagreti su orlaivio išilgine ašimi.



1.2.48 pav. Dviejų laipsnių giroskopo orientavimas orlaivyje kampiniams greičiams nustatyti

Anksčiau buvo parodyta, kad dviejų laipsnių giroskopo pagrindo sukimasis kampiniu greičiu, nukreiptu statmenai rėmo ir rotoriaus pakabų ašims, sukelia giroskopinį momentą ir greitėjantį giroskopo sukimąsi ašies OX_S atžvilgiu, kuris nustatomas pagal formulę:

$$\beta_g = -\frac{H}{B} n \frac{t^2}{2}, \tag{1.2.12}$$

čia β_g – kampinis greitis; H – kinetinis rotoriaus momentas; B – rotoriaus ir rėmo inercijos momentas ašies OX_S atžvilgiu (1.2.47 pav.).

Taigi dviejų laipsnių giroskopas yra ***posūkio arba kampinio greičio indikatorius***, tačiau išmatuoti juo kampinio greičio dydžio neįmanoma. Norint pakeisti dviejų laipsnių giroskopą *2* (1.2.49 pav.), į giroskopinį prietaisą, matuojantį kampinį greitį, ant ašies OX_S tvirtinama spyruoklė *3*, kuri atsveria giroskopinį momentą.

Spyruoklės sukeliamas momentas:

$$M_{SP} = -c\beta_g,$$

čia c – spyruoklės standumo koeficientas; β_g – rėmo sūkių kampinis greitis.

Be to, rėmo virpesiams slopinti pereinamųjų režimų pagal ašį Z_S metu statomas slopintuvas *4*, sukeliantis momentą:

$$M_d = -f\beta_g,$$

čia f – slopinimo koeficientas.

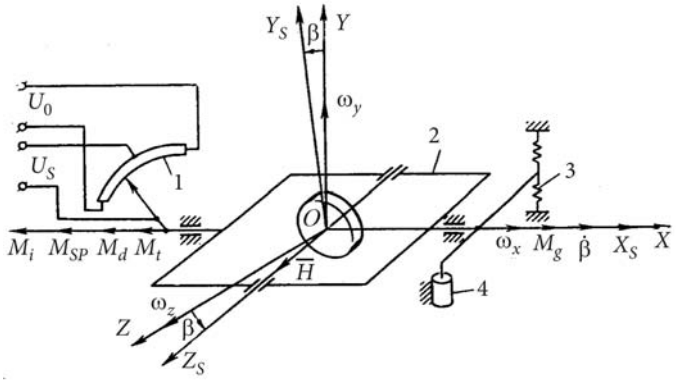
Tempo giroskopo signalui nuimti ant ašies OX_S statomas potenciometras *1* (1.2.49 pav.).

Panagrinėsime tempo giroskopo judesio lygtį. Tarsime, kad, be matuojamojo greičio ω_Y ašių Ox ir Oz atžvilgiu, egzistuoja greičiai ω_X ir ω_Z, t. y. giroskopo pagrindas atlieka erdvinį judėjimą. Tai realu, kai giroskopas įtvirtintas kaip pagrindas orlaivyje. Pagrindo sukimo sukeliamas giroskopinis momentas:

$$M_g = -HW_Y \cos\beta_g + HW_Z \sin\beta_g.$$

Inercijos jėgų momentas ašies OX_S atžvilgiu nustatomas išraiška:

$$M_i = -B\left(\overset{\circ\circ}{\beta}_g + \overset{\circ}{\omega} X\right).$$



1.2.49 pav. Tempo (slopinantysis) giroskopas

Momentų suma ašies OX_S atžvilgiu

$$M_i + M_g + M_{SP} + M_d + M_T = 0\,. \tag{1.2.13}$$

Įrašę į formulę (1.2.13) momentų reikšmes ir padaliję abi lygybės puses iš spyruoklės standumo koeficiento *c* bei atmetę trintį atramose ir tarę, kad kampas β_d yra mažas, gausime:

$$T^2 \overset{oo}{\beta}_g + 2\xi T \overset{o}{\beta} + \beta_g = -k\omega_y + k\omega_{ZPg} - T^2 \overset{o}{\omega} k\,, \tag{1.2.14}$$

čia $T = \sqrt{\frac{B}{c}}$ – laiko pastovioji; $\xi = \frac{f}{2\sqrt{B \cdot c}}$ – slopinimo koeficientas; $k = \frac{H}{c}$ – statinis perdavimo koeficientas.

(1.2.14) lygties sprendinys, esant $\omega_X = \omega_Z = 0$ ir $\omega_y = \omega_Y^0 = \text{const}$, yra:

$$\beta_g = -k\omega_Y^0 \left[1 - e^{-\frac{\xi}{T^2}} \left(\cos at + \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin at \right) \right], \tag{1.2.15}$$

čia $a = \frac{\sqrt{1-\xi}}{T}$.

Iš (1.2.15) sprendinio matyti, kad veikiant kampiniam greičiui ω_Y^0 giroskopo rėmas pradeda virpėti su vis mažėjančia virpesių amplitude nusistovėjusios rėmo nuokrypio reikšmės $\beta_g^0 = k\omega_Y^0$ atžvilgiu. Kai slopintuvo nėra ($f = 0$, $\xi = 0$), giroskopo rėmas virpa negęstančiais virpesiais, kurių amplitude lygi kampui β_g^0. Tokio prietaiso naudoti neįmanoma, todėl jame statomas slopintuvas.

Nuimamas nuo potenciometro ir perduodamas į orlaivio valdymo sistemą elektrinis signalas:

$$U_S^0 = k_p \beta_g^0 - k_p k \cdot \omega_g^0\,,$$

čia k_p – potenciometro perdavimo koeficientas.

Tempo giroskopų ***metodines*** paklaidas sukelia kampinis greitis ω_Z ir kampinis pagreitis ω_x^0.

Vadinamąsias ***prietaiso*** paklaidas lemia: nulinis signalas; jautrumo riba; statinio perdavimo koeficiento nestabilumas; rėmo ir rotoriaus inertiškumas.

Nuliniu vadinamas signalas, nuimamas nuo tempo giroskopo išėjimo įtaiso (šiuo atveju nuo potenciometro), esant nejudamajam prietaiso pagrindui. Šis signalas atsiranda dėl netikslaus „elektrinio nulio“ nustatymo, prietaiso išsibalansavimo išėjimo ašies atžvilgiu ir spyruoklės histerezės.

Rotoriaus išsibalansavimu sukeliamas nulinis signalas:

$$U_s^0 = k_g \frac{m_r g l}{c}\,,$$

čia m_r – rotoriaus masė; *g* – laisvo kritimo pagreitis; *l* – rotoriaus masės centro nuokrypio reikšmė nuo taško *O* išilgai ašies OZ_S.

Prietaiso ***jautrumo riba*** yra minimalusis kampinis greitis, kurį prietaisas gali išmatuoti. Jautrumo riba priklauso nuo giroskopo pakabų trinties. Minimalusis tempo giroskopu matuojamas kampinis greitis ω_y^{min} priklauso nuo minimalaus giroskopinio momento dydžio $M_g = H\,\omega_y^{min}$, kuris nugali trinties momentą, t. y. $H\,\omega_y^{min} \geq |M_T|$.

Taigi $\omega_y^{min} \geq \dfrac{|M_T|}{H}$.

Tempo giroskopo ***statinį perdavimo koeficientą*** galima išreikšti taip:

$$k = \frac{H}{c} = \frac{I\Omega}{c}.$$

Nukrypus prietaiso parametrams nuo pirminių reikšmių, absoliutusis perdavimo koeficiento pokytis bus:

$$\Delta k = \frac{\Omega}{c}\Delta J + \frac{J}{c}\Delta\Omega + \frac{J\Omega}{c}\Delta c.$$

Iš čia ***absoliučioji paklaida***, kylanti dėl statinio koeficiento nestabilumo:

$$\Delta U_s = -k_p \Delta k \omega_y^0 = -k_p\left(\frac{\Omega}{c}\Delta J + \frac{J}{c}\Delta\Omega + \frac{J\Omega}{c}\Delta c\right)\omega_y^0.$$

Skirtingai nuo pirmų trijų, paklaida dėl ***rėmo ir rotoriaus inertiškumo*** yra dinaminė ir atsiranda prietaiso pagrindui sukantis, kai ω_y = const.

Atskiru, bet artimu praktikai atveju, kai ω_y kinta pagal harmoninį dėsnį, tai yra:

$$\omega_y = \omega_y^0 \sin qt, \tag{1.2.16}$$

čia q – giroskopo pagrindo virpesių dažnis.

Tarę, kad (1.4.14) $\omega_x = \omega_z = 0$ ir įvertinę (1.4.16), nagrinėjamam atvejui turėsime: $T^2\ddot{\beta}_g + 2\xi\dot{\beta}_g + \beta_g = -k\omega_y^0 \sin qt$.

Priverstiniai giroskopo virpesiai nustatomi išraiška:

$$\beta_g = \beta_g^0 \sin\left[qt + \varphi(q)\right],$$

čia $\beta_g^0 = -\dfrac{k\omega_y^0}{\left(1 - T^2q^2\right) + 4\xi^2T^2q^2}$; $\varphi(q) = \operatorname{arctg}\left(-\dfrac{2\xi q}{1 - T^2q^2}\right)$.

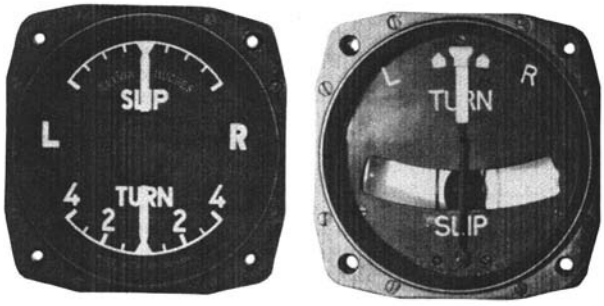
Taigi signalo reikšmė, gaunama tempo giroskopu, priklauso ne tik nuo kampinio greičio ω_y^0 amplitudės, bet ir nuo giroskopo pagrindo virpesių kampinio dažnio q. Kaip ir kiekvienoje virpamojoje sistemoje, taip ir tempo giroskope, sutapus nuosavųjų virpesių dažniui su dažniu q, gali atsirasti neigiami ***rezonanso*** reiškiniai. Norint šito išvengti, tempo giroskopai konstruojami taip, kad jų nuosavųjų virpesių dažnis būtų viena eile ir daugiau didesnis už galimus orlaivio konstrukcijomis sukeliamus virpesius.

Posūkio (viražo) posvyrio ir slydimo rodikliai. Norint sėkmingai valdyti orlaivį, reikia žinoti ne tik jo polinkio ir posvyrio kampus, bet ir kampinį posūkio greitį. Kaip žinome, kampinio posūkio greičio rodiklis gali būti realizuotas naudojant tempo giroskopą.

Posūkio ir posvyrio rodiklis, vienas iš seniausių aviacinių giroskopinių prietaisų, kartu su magnetiniu kompasu labai pasitarnavo tobulinant skrydžio meistriškumą be išorinių nuorodų. Tačiau aviacinei technikai sparčiai vystantis per paskutiniuosius dešimtmečius, radikaliai keitėsi ir skrydžių valdymo reikalavimai bei technologijos. Buvo sukurta ir įdiegta į skrydžių valdymo praktiką daug naujų, pažangių avionikos prietaisų bei sistemų. Todėl posūkio ir posvyrio rodiklis, kaip atskiras aviacinis prietaisas, šiuo metu naudojamas tik mažuose arba mėgėjiškos paskirties orlaiviuose.

Posūkio ir posvyrio rodiklį sudaro du nepriklausomi mechanizmai: giroskopo valdomos bei posūkio kampinį greitį nustatančios ir jį vaizduojančios rodyklės mechanizmas bei mechanizmas, nustatantis ir

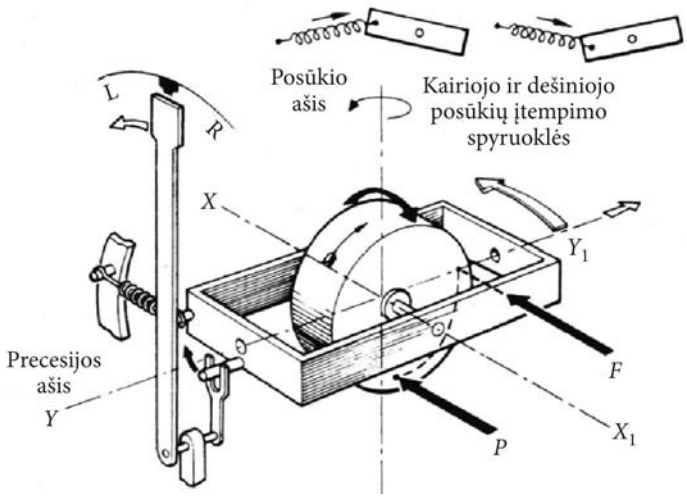
atvaizduojantis orlaivio posvyrį ir (arba) slydimą. Tokio prietaiso du tipiniai dvigubo pateikimo indikatoriai parodyti 1.2.50 pav.



1.2.50 pav. Tipiniai dvigubo pateikimo posūkio ir posvyrio indikatoriai

Posūkio greičio indikacija. Posūkio greičiui nustatyti panaudojamas tempo giroskopas ir jo precesija, kaip tai parodyta 1.2.51 pav.

Kai prietaisas yra normalioje padėtyje spyruoklė palaiko giroskopo rotoriais sukimosi ašį horizontalioje padėtyje, o posūkio rodyklė yra nulinėje padėtyje. Rotoriaus sukimasis stabilizuoja sistemą ir rodyklės padėtį posūkio skalės nulio atžvilgiu. Prietaisui pasisukus aplink vertikaliąją ašį į kairę, pasisuka kardaninės pakabos rėmas, tačiau giroskopas priešinasi sukimosi judesiui, sukeldamas precesiją aplink ašį YY_1. Precesijos kryptis nustatoma pagal nesudėtingą taisyklę (žr. 1.2.1 poskyrį). Taigi kairysis posūkis sukelia jėgą F, veikiančią giroskopo rotoriaus disko kraštą jo sukimosi ašies XX_1 kryptimi. Giroskopas priešinasi jo ašies posūkiui, sukeldamas jo sukimosi kryptimi jėgos F atžvilgiu 90° kampu perstumtą precesijos momentą P, veikiantį ašies YY_1 atžvilgiu ir kompensuojantį jėgos F poveikį, grąžinantį sukimosi ašies pirmykštę padėtį.



1.2.51 pav. Posūkio rodiklio mechanizmas

Vykstant šiam procesui posūkio metu, priklausomai nuo posūkio kampinio greičio jėga F pradžioje įtempia kairiojo posūkio spyruoklę, pasukdama giroskopo rėmą ir prie jo pritvirtintą posūkio rodyklės ašį į dešinę, vėliau, veikiant giroskopo precesijos momentui, posūkio pabaigoje, grąžina rėmą ir rodyklę į pirmykštę nulinę padėtį. Taigi rodyklė seka tempo giroskopo kardaninėje pakaboje vykstantį jėgų pasiskirstymo pereinamąjį procesą, atvaizduodama savo padėtimi sukimo momento, sukeliančio rėmo poslinkio, proporcingo orlaivio posūkio kampiniam greičiui, kitimą posūkio metu.

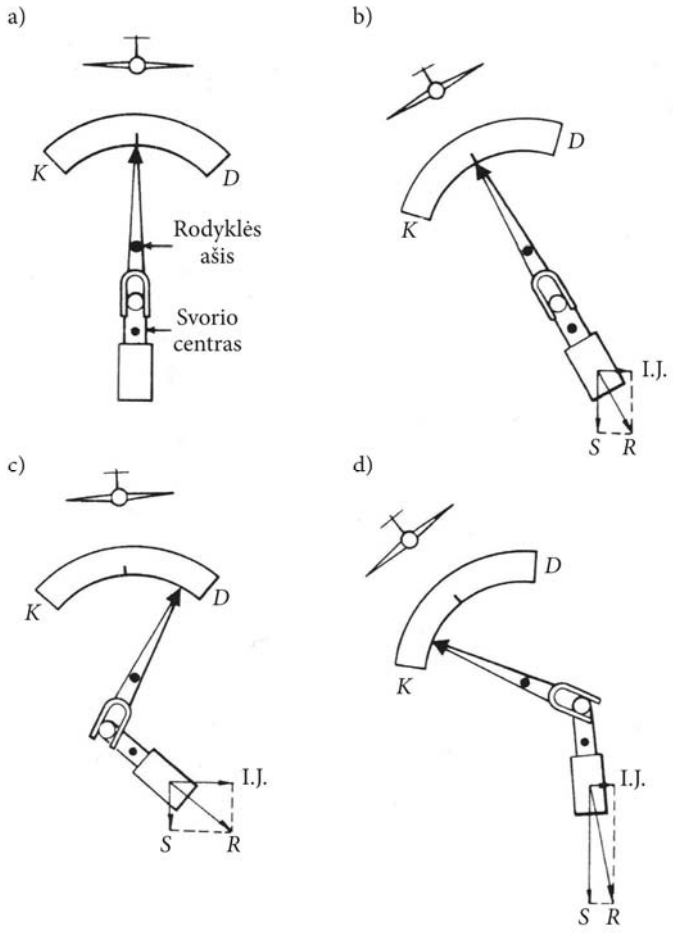
Praktikoje kardaninės pakabos rėmo poslinkiai paprastai neviršija 6°, kadangi juos apriboja stačiuoju kampu giroskopo rėmą veikiančių jėgų, sukeliančių jo kampinius poslinkius, posūkio greičio komponen-

tės nebuvimas. Posūkio greičio rodyklė valdoma pakabos rėmo poslinkio perdavimo bei stiprinimo mechanizmu, kurio konstrukcija gali keistis priklausomai nuo prietaiso gamintojo.

Prietaiso rodytuvo skalė paprastai kalibruojama pagal nustatytus „standartinius“ kampinius greičius, nors ne visada smulkiai ženklinama. Priimta skaidyti posūkio kampinių greičių matavimo diapazoną į keturias pagrindines dalis nuo 1 iki 4, pagal posūkio greičius: 180, 360, 540, ir 720° per minutę ir žymėti posūkio indikatoriuje, kaip parodyta 1.2.50 pav. Posūkio rodikliuose dažniausiai naudojami giroskopai su pneumatine sukimo pavara. Tipinis rotoriaus sukimo greitis būna intervale nuo 4000 iki 4500 sūkių per minutę.

Posvyrio kampo indikacija. Prie pirminio posūkio greičio indikatoriaus taip pat būtina turėti papildomą tikslią posvyrio kampo indikaciją konkretaus orlaivio posūkio metu. Šiai indikacijai realizuoti gali būti naudojamas mechanizmas, veikiantis dėl gravitacijos ir išcentrinių jėgų sąveikos. Galimi du tokio mechanizmo realizavimo būdai: pirmasis, kai taikomas „rodyklės su pasvaru“ metodas, ir antrasis – „rutulių riedėjimo“ lanko pavidalo kanale būdas (žr. dešinįjį rodiklį 1.2.50 pav.).

Orlaivio posūkio (viražo) metu posvyrio ir slydimo rodytuvo, veikiančio pagal rodyklės su pasvaru metodą, schema parodyta 1.2.52 pav. Skrendant tiesiai ir horizontaliai (diagrama (a)), rodyklę su pasvaru veika tik gravitacinė jėga, posvyrio rodyklė rodo nulį. Diagramoje (b) orlaivis daro posūkį į kairę su reikiamu oriniu greičiu ir posvyriu. Gravitacinės (svorio) (S) ir inercinės (I. J.) jėgų atstojamoji (R) nukreipta išilgai rodyklės ir pasvaro ašių. Posūkio indikacijos skalė seka orlaivio padėtį ir posvyrio rodyklė rodo reikiamą (teisingą) orlaivio posvyrį. Tačiau, kada posūkis su teisingu posvyrio kampu baigiasi, rodyklė, valdoma dviejų minėtųjų jėgų pusiausvyros, kartu su posūkio skale grįžta į pirmykštę padėtį. Jei orinis greitis sumažėja posūkio metu, sumažėja ir posvyrio kampas bei išcentrinė jėga taip, kad posvyrio kampas atitiktų sumažėjusį posūkio greitį. Tada, posvyrio rodyklė ir pasvaro švytuoklės išilginės ašys sutampa ir išlieka nulinėje padėtyje.



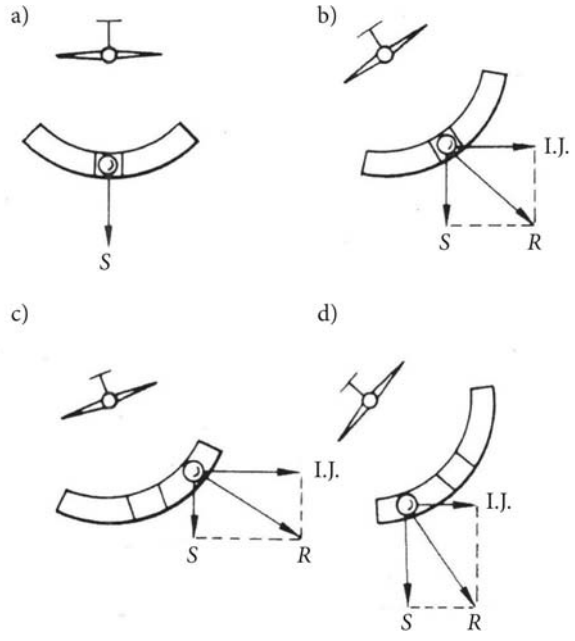
1.2.52 pav. Gravitacinis-inercinis rodyklės su pasvaru būdas posvyrio kampo indikacijai: a – lygusis skrydis; b – taisyklingasis posvyris; c – viršutinis viražas (šliaužimas iš posūkio); d – žemutinis viražas (slydimas į posūkį)

Jei orlaivio posvyrio kampas neatitinka posūkio kampinio greičio, kaip parodyta viršutinio viražo diagramoje (c), tai orlaivis pradeda slysti iš posūkio. Išcentrinė jėga tampa vyraujanti, palyginti su gravitacine, ir išstumia pasvarą bei rodyklę iš nulinės padėties. Jei posūkis žemutinio viražo, kaip diagramoje (d), orlaivis pradeda slysti į posūkį. Šiuo atveju priklausanti nuo gravitacinės traukos jėga įgauna pasvarui vyraujantį poveikį. Rodyklė nustumiama nuo nulinės padėties priešinga kryptimi, ir tai atitinka žemutinį viražą.

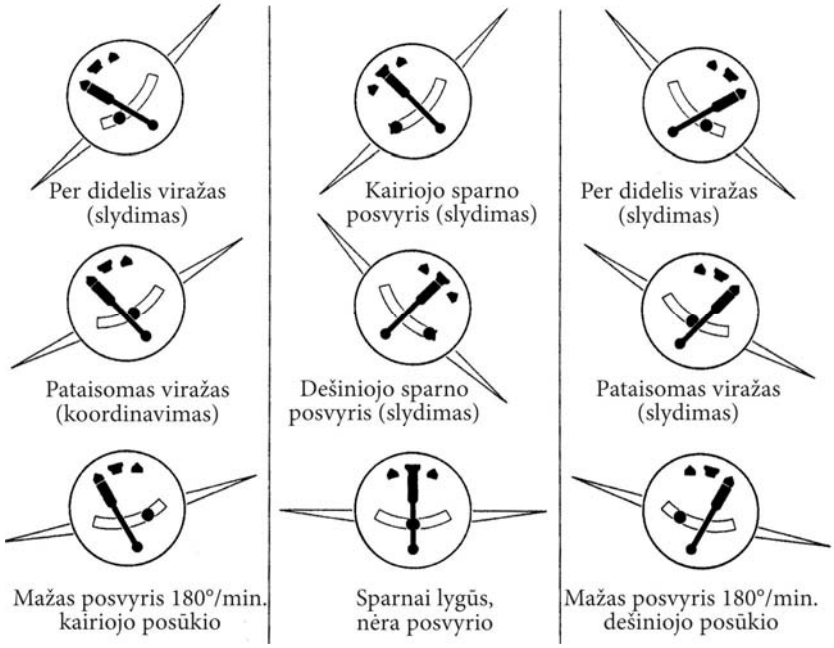
Teisingojo bei neteisingojo posūkio ir posvyrio santykio efektai rutulinio tipo rodikliuose panašūs į aprašytuosius. Esminis skirtumas tas, kad rutulių poslinkio kryptis yra priešinga anksčiau nagrinėtojo indikatoriaus rodyklės padėčiai. Tai matyti iš 1.2.53 pav. pateiktų diagramų bei 1.2.54 pav. posvyrio ir slydimo indikacijos pavyzdžių.

Tipiniai indikatoriai. Tipinė ***oru valdomo kampinio greičio ir posvyrio-slydimo rodiklio*** konstrukcija pateikta 1.2.55 pav. Oras patenka į prietaisą per filtrą, esantį užpakalinėje prietaiso dalyje prie oro įvado prijungimo vamzdžio, prieš tūtos bloką. Oro pavaros tūta įtaisyta kampu taip, kad varančiojo oro srautas būtų reikiamai nukreiptas į rotoriaus sparnuotę. Indikatoriuje įtaisytos rodyklės kryptis sutampa su orlaivio kryptimi. Orlaivio posūkio metu rodyklės viršūnė nukrypsta nuo nulinės padėties posūkio greičio skalės atžvilgiu į posūkio pusę tiek, kokiu greičiu atliekamas posūkis. Giroskopo jautrumas nustatomas keičiant vienos iš rodyklės posūkį valdančių spyruoklių įtempimą. Reguliavimo varžtas atsikišęs įduboje ant kronšteino, pritvirtinto ant priekinės mechanizmo plokštės.

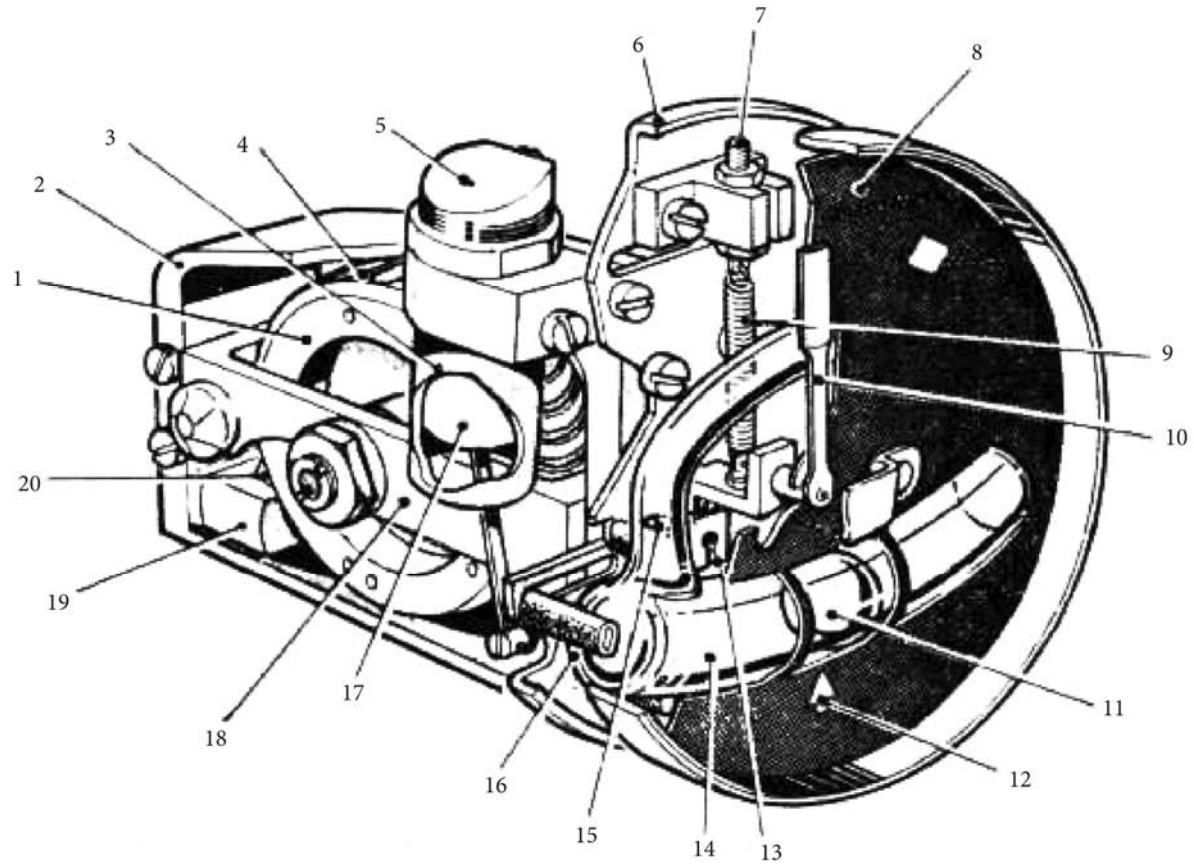
Maksimalų rodyklės atsilenkimą (kairė ar dešinė) posūkio greičio indikacijos metu apriboja didžiausias galimas pakabos rėmo poslinkis ir jį atitinkanti patogi stebėti skalė. Kardaninės pakabos rėmo slopinimas atliekamas pakankamai paplitusiu būdu, naudojant cilindro pavidalo amortizatorių, kurio judantysis stūmoklis susiejamas su kardaninės pakabos rėmu. Cilindre judėdamas stūmoklis išstumia (išleidžia) iš jo arba įsiurbia į jį orą per mažą angą, kurios dydis parenkamas pagal reikiamą judesio slopinimo laipsnį. Slydimo indikatorius turi į skaidraus skysčio pripildytą lanko pavidalo vamzdelį įdėto slankiojančio rutuliuko pavidalą. Už vamzdelio yra švytinčiais dažais sugraduota jo formą atitinkanti skalė. Vamzdelis užpildomas skaidriu spiritu.



1.2.53 pav. Rutulinio-tipo posvyrio rodiklio elementai: a – lygusis skrydis; b – teisingasis posvyris; c – slydimas iš posūkio; d – slydimas į posūkį



1.2.54 pav. Orlaivio posvyrio ir slydimo indikacijos pavyzdžiai, atliekant posūkį (viražą)

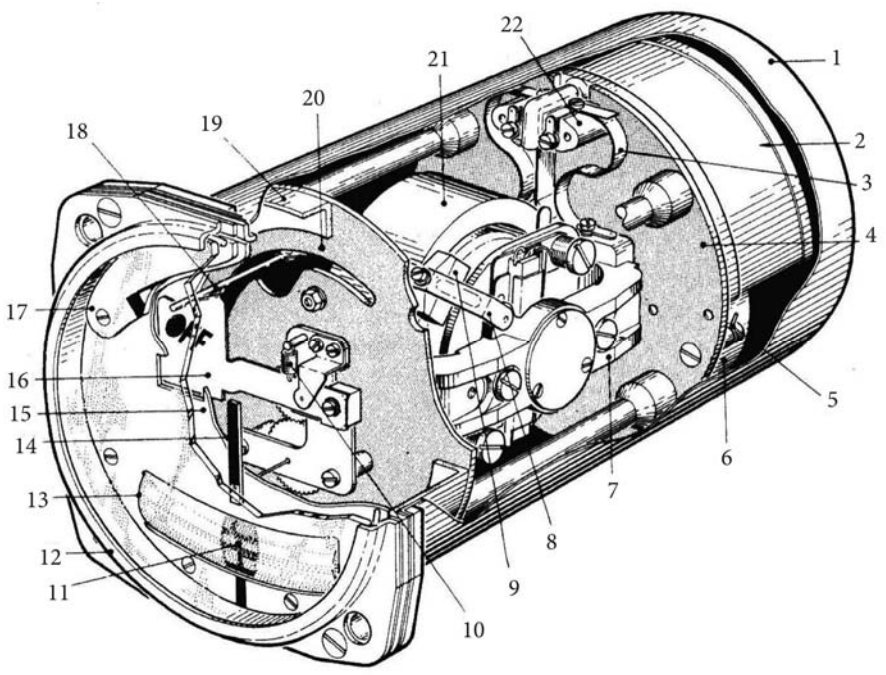


1.2.55 pav. Oru valdomo posūkio ir posvyrio indikatoriaus mechanizmas: 1 – rotorius; 2 – prietaiso korpusas; 3 – slopinimo cilindras; 4 – sparnuotė; 5 – oro išleidimas; 6 – priekinė plokštė; 7 – sūkio spyruoklės reguliavimo varžtas; 8 – ciferblatas; 9 – sūkio spyruoklė; 10 – rodyklė; 11 – rutuliukas iš agato; 12 – padėties rodyklė; 13 – kardaninės pakabos priekinė ašis; 14 – slydimo indikatorius; 15 – plėtimosi kamera; 16 – švytinti skalė; 17 – slopintuvo cilindras; 18 – kardaninė pakaba; 19 – oro įsiurbimo tūtos blokas; 20 – tūta

Tipinė posūkio ir ***posvyrio-slydimo rodiklio su tiesioginiu valdymu*** konstrukcija parodyta 1.2.56 pav. Ją sudaro tiesiogiai elektriniu giromotoru valdoma tempo giroskopo kardaninės pakabos sistema.

Giromotoro rotorius turi sterblės pavidalo armatūrą ir išorinį rėmą, sumontuotą koncentriškai tam, kad padidėtų rotoriaus masė ir sukimosi spindulys. Armatūra sukasi kardaninės pakabos žiede įtvirtintame cilindro pavidalo pastovaus dviejų polių magneto statoriuje. Tiesioginis giromotoro maitinimas atliekamas laksčiais juostelių pavidalo šliaužimo kontaktais per maitinimo srovės valdymo įrenginį taip, kad netrukdyti vidinio rėmo judesių. Rotoriaus sukimosi greitis valdomas dviem identiškais, simetriškai išdėstytais išcentriniais išjungikliais. Kiekvienas išjungiklis turi porą valdančiųjų kontaktų su platininiais antgaliais, vieną fiksuotąjį, kitą –judamąjį, kurie normalioje padėtyje yra tarpusavyje sujungti ir palaikomi tokios būsenos įtempimo spyruokle, turinčia įtempimo reguliatorių. Tarp kiekvieno išjungiklio kontaktų yra įjungtas varžas, kuris, atsijungus kontaktams, nuosekliai įjungiamas rotoriaus apvijai, maitinamai per jį elektros srove. Kai pasiekiamas maksimalus rotoriaus sukimosi greitis, išcentrinė jėga, veikianti išjungiklių kontaktų įtempimo spyruokles, tampa pakankama, kad juos atjungtų. Kontaktai atsijungia, ir tekanti per įjungtus tarp kontaktų varžus giromotorą maitinanti elektros srovė sumažėja, sumažindama ir rotoriaus sukimosi greitį. Abu išjungikliai sureguliuoti taip, kad būtų palaikomas pastovus reikiamas rotoriaus sukimosi greitis.

Kampinis kardaninės pakabos rėmo sukimosi greitis perduodamas rodyklei per jungiamąjį perdavimo mechanizmą ir magnetoelektrinį slopintuvą, sumontuotą galinėje giromazgo dalyje. Slopintuvo veikimas pagrįstas ritės, per kurią teka srovė, magnetinio lauko sąveika su pastoviojo magneto lauku. Ritė yra prietaiso korpuse, o pastovusis magnetas, susietas su pakabos rėmu, pasisuka ritės atžvilgiu sukantis judamajai sistemai. Atsirandanti ritės ir magneto magnetinių laukų sąveika sukelia pasipriešinimo momentą, judamosios sistemos pakabos ašies atžvilgiu proporcingą jos posūkio greičiui.



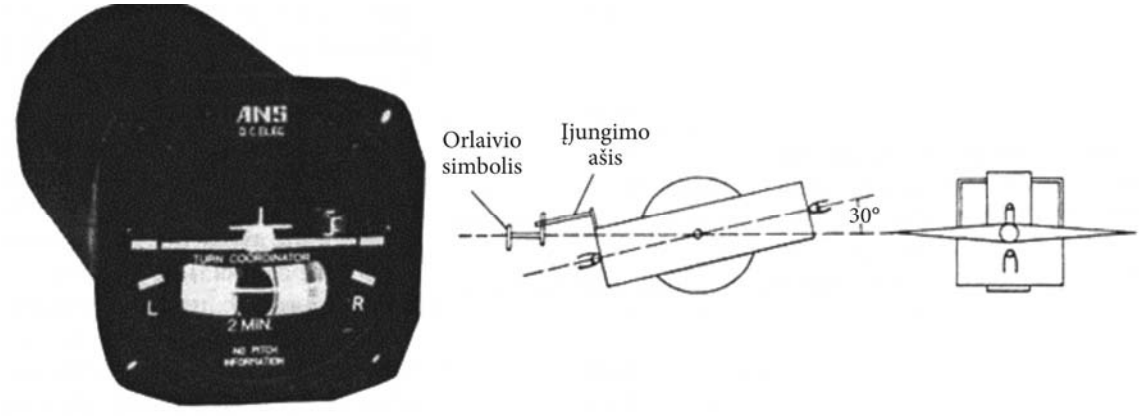
1.2.56 pav. Tipinio kampinio greičio ir slydimo rodiklio konstrukcija su tiesioginiu valdymu: 1 – korpusas; 2 – slopinimo mazgas; 3 – tiekimo spyruoklė; 4 – galinė plokštė; 5 – izoliuojančioji jungtis; 6 – magneto-elektrinis slopintuvas; 7 – kardaninė pakaba; 8 – apkaba; 9 – apkabos magnetas; 10 – atstojamoji spyruoklė; 11 – rutuliukas; 12 – griovelis; 13 – slydimo rodiklis; 14 – rodyklė; 15 – apskritoji skalė; 16 – išjungimo ženklas; 17 – posūkio kampinio greičio skalė; 18 – apkabos rankovė; 19 – disko rėmas; 20 – priekinio rėmo plokštė; 21 – giroskopo rotorius; 22 – šliaužiančiojo elektrinio kontakto izoliatorius

Prietaiso maitinimo sutrikimą įspėjantis ženklas „IŠ“ yra ant sverto peties, pritvirtinto prie giroskopo pakabos rėmo ašies. Kai giroskopas veika normaliai (rotorius sukasi pastoviu greičiu), įspėjančiojo ženklo sverto petys, palaikomas per elektromagnetą tekančia srove, yra tokioje padėtyje, kad užrašo „IŠ“ nesimato. Sutrikus giromotoro maitinimui ir jo rotoriaus sukimosi greičiui, sumažėja tekanti per elektromagnetą

srovė ir svertas linksta žemyn, keisdamas savo padėtį taip, kad prietaiso rodytuvo skalės fone atsiranda įspėjamasis ženklas „IŠ“.

Posūkio koordinatorius. 1.2.57 pav. parodytas prietaisas iš esmės tėra anksčiau aprašytojo posūkio ir posvyrio indikatoriaus įdomus patobulinimas, atliekantis kelių prietaisų funkcijas ir sėkmingai naudojamas mažuose bendrosios aviacijos orlaiviuose.

Pagrindinis posūkio koordinatoriaus skirtumas – jo jautrumas ne tik orlaivio posūkio, bet ir jo posvyrio greičiams, kuris atsirandantis palenkiant prietaiso posvyrio indikacijos išilginės ašies padėtį orlaivio išilginės ašies atžvilgiu 30° kampu (1.2.57 pav.).



1.2.57 pav. Posūkio koordinatorius

Kadangi orlaivio posūkis natūraliai inicijuoja jo posvyrį, tuomet giroskopas atlieka precesiją ir kartu pasuka posūkio koordinatoriaus orlaivio simbolį, parodydamas posvyrio kryptį ir suteikdamas pilotui galimybę tikėtis sėkmingo posūkio. Tuomet pilotas valdo posūkį reikiamu greičiu, pagal indikatoriaus išorinės skalės padalas išlygindamas orlaivio simbolį. Pavyzdžiui, skalėje gali būti standartinio posūkio padalos, atitinkančios posūkį 360° kampu per 2 min.

Posūkio koordinatorius turi slenkančiojo rutuliuko tipo rodiklį, liekantį centre esant normaliam skrydžiui. Prietaise naudojamas hidraulinis slopintuvas su hermetizuotu cilindru, susietu su rėmo pakabos ašimi. Erdvė tarp prietaiso korpuso ir cilindro užpildyta silikonu – specialiu klampiu skysčiu. Sukantis cilindrui, silikonas sukelia hidraulinį slopinimą. Be to, silikonas iš dalies kompensuoja cilindro su judamąja sistema svorį ir sumažina slėgį atramose, todėl sumažėja trintis ir padidėja prietaiso tikslumas. Posūkio koordinatoriuose gali būti naudojami oru varomi arba elektriniai giromotorai. Giroskopo rotorius sukamas apytikriai 6000 sūkių per minutę greičiu.

Korekcijos išjungikliai skirti įvairių giroskopinių prietaisų korekcijos sistemų elektrinėms grandinėms išjungti, kai orlaivis, atlikdamas posūkius, pasiekia nustatytą posūkio greitį.

Orlaivio posūkių metu atsirandančios išcentrinės jėgos sukelia tiesinius pagreičius, neigiamai veikiančius koreguojančiųjų įtaisų jautriuosius elementus, dėl ko nuo pasirinktosios padėties krypsta giroskopo pagrindinė ašis. Išvengiant neteisingos korekcijos, tam skirtus įrenginius orlaivio posūkių metu reikia ***išjungti***. Tačiau, esant mažiems posūkių kampiniams greičiams, ilgalaikis korekcijos išjungimas gali sukelti esminių giroskopo ašies nuokrypių, didesnių už galimas paklaidas, atsirandančių veikiant išcentrinėms jėgoms. Tai riboja ***žemiausią*** kampinio greičio dydį, kuriam esant tikslinga išjungti korekciją.

Tiesinio skrydžio metu galimi orlaivio kampiniai (***naršymo***) virpesiai, sukeliantys korekcijos sistemų jautriųjų elementų virpesius. Šie pakankamai tolygūs virpesiai lemia daug mažesnes paklaidas negu giroskopo ašies nuokrypiai, esant ilgalaikiam korekcijos išjungimui. Todėl korekcijos išjungikliuose turi būti numatyta korekcijos išjungimo vėlinimo galimybė.

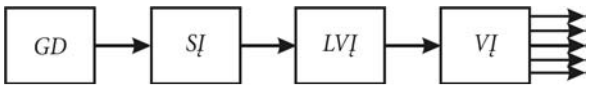
Korekcijos išjungiklis (1.2.58 pav.) – tai giroskopinis kampinio greičio daviklis (1.2.59 pav.), turintis slenkstinį elementą, laiko vėlinimo ir vykdomuosius įtaisus.

Atsiradus orlaivio kampiniam posūkio greičiui, giroskopinis daviklis *GD* siunčia signalą į slenkstinį įtaisą *SĮ*, kuris generuoja signalą korekcijai išjungti, kada orlaivio kampinis greitis pasiekia nustatytą ribinį dydį.

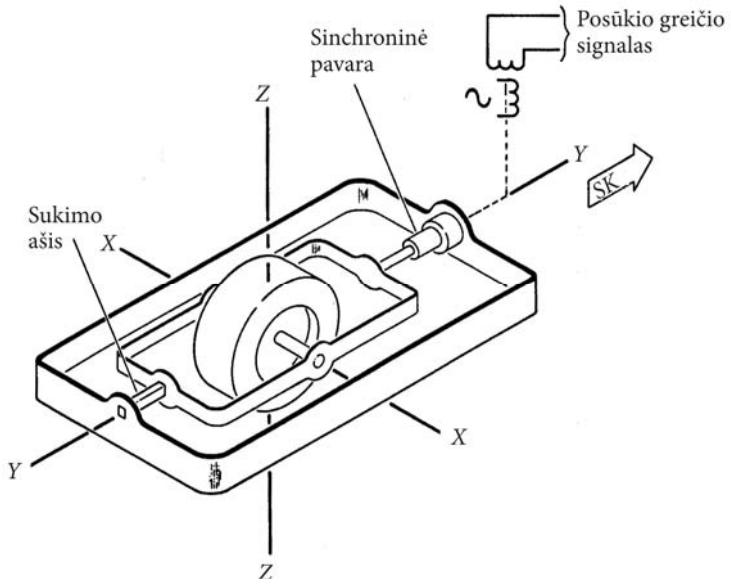
Laiko vėlinimo įtaisas *LVĮ* suvėlina korekcijos išjungimą, kai trumpalaikiai kampiniai greičiai viršija nustatytą ribą.

Vykdomojo įtaiso *VĮ* funkcijas atlieka elektromagnetinė relė, per kurios normaliai sujungtus kontaktus maitinamos korekcijos įtaiso elektrinės grandinės. Kai iš suvėlinimo įtaiso *LVĮ* signalas patenka į relę, ji išjungia giroskopinių prietaisų korekcijos įtaiso maitinimo grandinę.

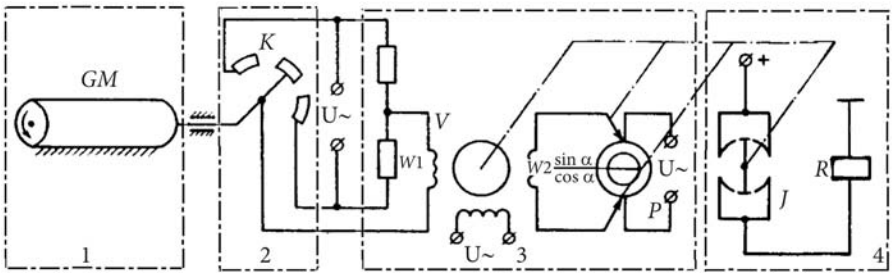
1.2.60 pav. pateikta viena iš galimų korekcijos išjungiklio schemų. Šiame išjungiklyje slenkstinis įtaisas yra kontaktinė grupė *K*, kurios centrinis kontaktas mechaniškai susietas su giromazgo *GM* sukimosi ašimi. Kontaktinės grupės *K* tarpai sureguliuoti taip, kad kontaktai susijungtų, esant ribiniam kampiniam greičiui, lygiam 0,1–0,3 laips/s. Susijungiant kontaktams *K*, per valdančiąją variklio *V* apviją *W1*, kuri įjungta į tiltelio schemą, teka srovė. Variklis *V* per reduktorių pasuka potenciometro *P* šliaužiklius ir išjungiklio *J* centrinį kontaktą. Išjungiklio *J* kontaktinės grupės tarpai ir centrinio kontakto sukimosi greitis parinktas taip, kad kontaktai susijungia per 5–15 s po variklio *V* rotoriaus sukimosi pradžios. Susijungus išjungiklio *J* kontaktams, įsijungia relė *R*, kuri savo kontaktais išjungia tam tikrų giroskopinių prietaisų korekciją.



1.2.58 pav. Tipinė korekcijos išjungiklio schema: *GD* – giroskopinis daviklis; *SĮ* – slenkstinis įtaisas; *LVĮ* – laiko vėlinimo įtaisas; *VĮ* – vykdomasis įtaisas



1.2.59 pav. Giroskopinio kampinių greičių daviklio (GD) principinė schema



1.2.60 pav. Korekcijos išjungiklio schema

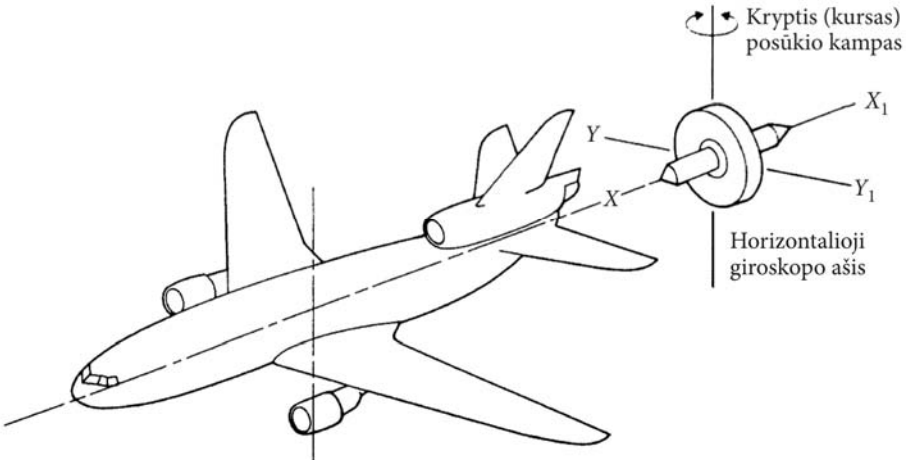
Potenciometro *P* šliaužiklio posūkis sukelia įtampos perdavimą valdančiajai variklio *V* apvijai *W2*. Apvijos *W1* ir *W2* įjungtos priešingai viena kitai. Taigi potenciometro *P* šliaužikliams pasisukant nurodytu kampu, atitinkančiu išjungiklio *J* kontaktų sujungimo kampą, apvijų *W1* ir *W2* magnetiniai srautai susilygina ir variklis sustoja. Nurodytoje schemoje suvėlinimo įtaiso vaidmenį atlieka variklis *V* ir potenciometras *P*. Po orlaivio posūkio pabaigos giromazgo *GM* sukimosi ašis, veikiama spyruoklės, grįžta į pirminę padėtį ir kon-

taktai *K* išsijungia. Apvijoje *W1* nutrūksta srovė ir, veikiant magnetiniam srautui apvijoje *W2*, variklis sukasi atgaline kryptimi, kol potenciometro *P* šliaužikliai neatsiduria neutralioje padėtyje. Tuo metu išsijungia išjungiklio *J* kontaktai, relė *R* išsijungia ir įsijungia giroskopinių prietaisų korekcija.

1.2.6. Giroskopinis krypties rodytuvas

Giroskopinis krypties rodytuvas DI (***Direction Gyro Indicator***) naudoja trijų laisvės laipnių giroskopą, gebantį nekintamai laikyti savo pagrindinės ašies, orientuotos horizontaliojoje plokštumoje, kryptį orlaivio kurso skalei stabilizuoti 1.2.61 pav.

Tai gali būti rankiniu būdu suderinta su tiesioginio nuskaitymo magnetiniu kompasu, kuris lengvame orlaivyje sukuria stabilų kryptinį nurodymą palaikantį numatytą orlaivio skrydžio kursą. Giroskopinis krypties indikatorius nemagnetinis ir nepriklauso nuo posūkių bei pagreičio nuokrypių, staigaus žemėjimo ar magnetinių trukdžių. Toks indikatorius rodo tikslų „nurimusį“ orlaivio kursą ir nedelsiant bet kokius orlaivio kurso nuokrypius. Giroskopinis krypties rodytuvas nenustato šiaurinės krypties, tačiau gali būti valdomas krypties duomenimis nuo išorinių šaltinių, gautų iš tiesioginio nuskaitymo kompaso. Be to, giroskopinius krypties rodytuvus būtina koreguoti pagal tiesioginio nuskaitymo kompasą pastoviais laiko intervalais, nes po pirminio sinchronizavimo giroskopas gali nukrypti, ypač figūrinio skraidymo metu. Giroskopinis krypties rodytuvas papildo, bet nepakeičia tiesioginio nuskaitymo kompaso DRC.



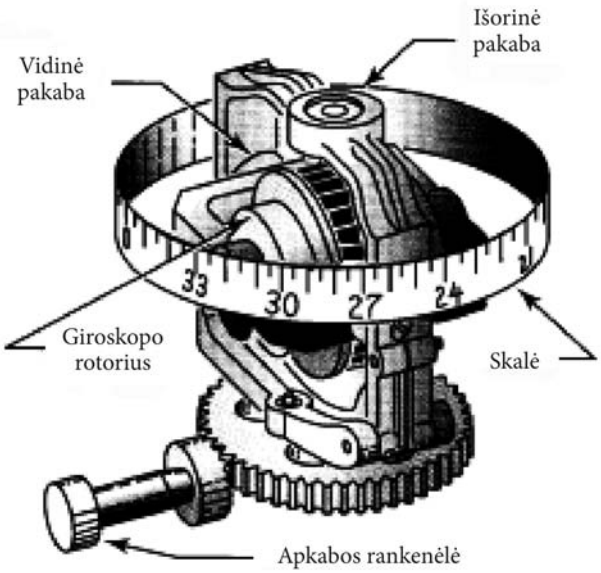
1.2.61 pav. Krypties giroskopo orientavimas orlaivyje

Krypties rodytuvo struktūra. Prietaisas (1.2.62 pav.) gali būti valdomas oru arba elektra. Kai jis valdomas orine pavara, giromotoro horizantalioji giroskopo ašis apytiksliai sukama 10 tūkst. sūkių per minutę greičiu.

Krypties azimuto skalė sužymėta nuo 0° iki 360° su minimaliomis padalomis kas 5°, stambesnėmis pagrindinėmis padalomis kas 10° ir pažymėta skaičiais kas 30°. Skalė nuskaitoma pagal lėtai besisukančią vertikaliąją liniją. Apačioje krypties (azimuto) rodytuvo 1.2.63 pav. skydelio stiklo yra mygtukas, kuris yra naudojamas giroskopui uždaryti ir pasukti nustatytu kursu.

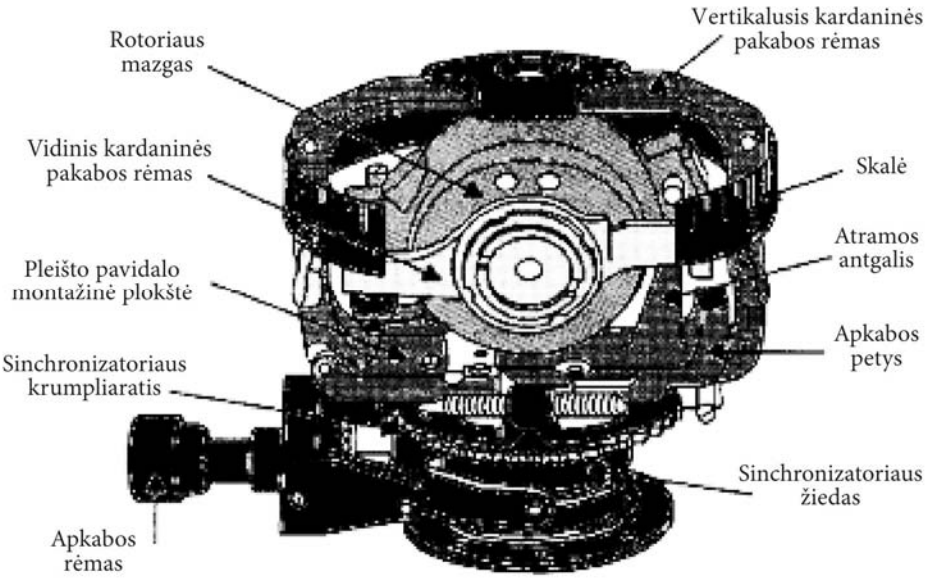
Krypties giroskopo veikimo principas. 1.2.64 pav. pavaizduotas krypties giroskopo mechanizmas, esant tipinei oro varomo prietaiso versijai.

Rotorius sukasi apie savo horizontaliai nukreiptą ašį ir yra įtvirtintas vidinės kardaninės pakabos rėmo guoliuose, kurie leidžia laisvai sukinėti rotoriaus ašį vertikalioje plokštumoje 110° sektoriuje (t. y. po 55° į kiekvieną pusę nuo centrinės padėties). Vidinės kardaninės pakabos rėmas, remdamasis į guolius vertikaliajame išorinės kardaninės pakabos rėme, leidžia keisti giroskopo ašies azimutą 360° kampu apie vertikaliąją ašį. Atramos antgalis, esantis išorinėje kardaninėje pakaboje, nukreipia oro srautą į rotoriaus menteles. Šiuo veiksmu, kurį sukelia oras rotoriui, maždaug po 5 min. veikimo, kai vakuumo pompa išvysto pilną įsiurbimo galngumą, pasiekiamas jo sūkių darbinis greitis. Oro srautas taip pat patvirtina rotoriaus sukimąsi orlaivio vertikaliojoje plokštumoje, kaip parodyta 1.2.65 pav.

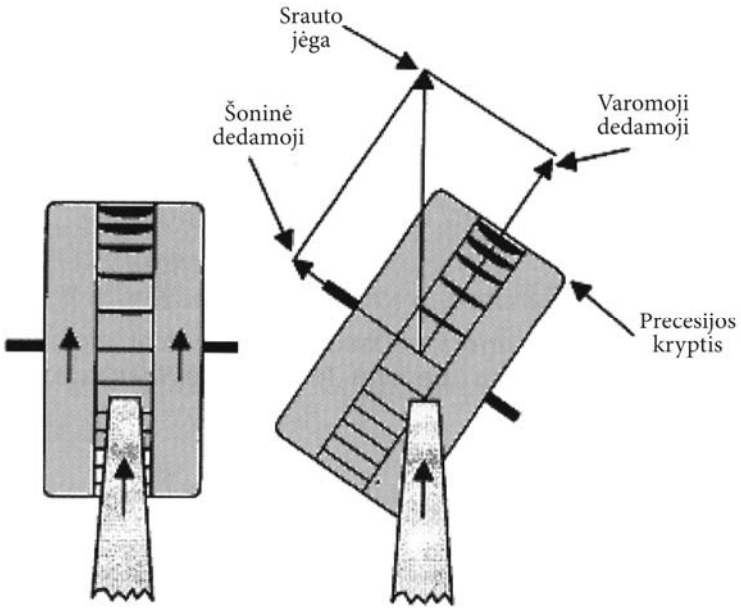


1.2.62 pav. Krypties rodytuvo struktūra

1.2.63 pav. Krypties rodytuvo priekinė panelė



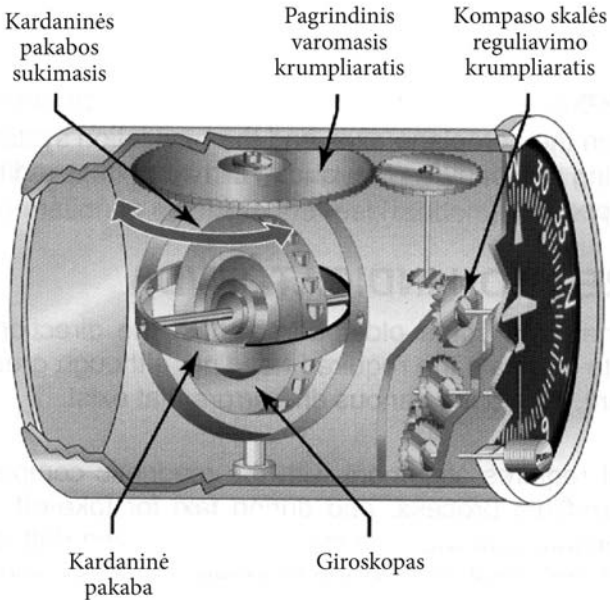
1.2.64 pav. Oru varomo krypties giroskopo konstrukcija



1.2.65 pav. Oro srauto poveikio rotoriui schema

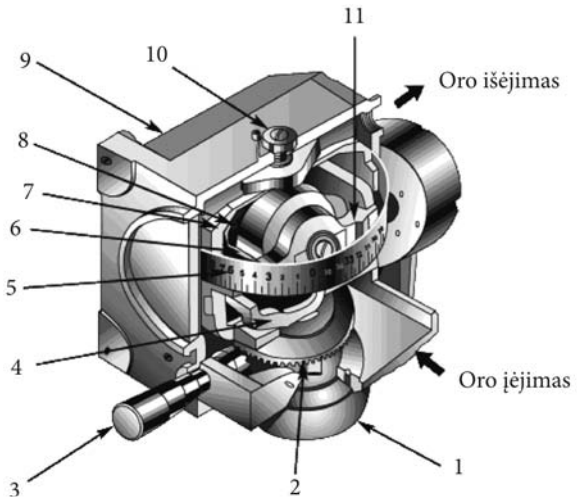
Jeigu giroskopas pasvyra, srauto jėgos sudedamoji dalis nukrypsta į reikiamą rotoriaus kampą ir sukuria reikiamą jėgą, kurią sukelia giroskopas.

1.2.66 pav. indikatoriaus skalė yra prijungta prie išorinės kardaninės pakabos, tačiau kai kuriais atvejais sinchronizatoriaus krumpliaračio žiedas juda nuosekliai su krumpline pavara, kuri ir sujungia žiedo judamuosius elementus į vertikaliąją ašį, kaip tai parodyta 1.2.66 pav.



1.2.66 pav. Krypties giroskopo sujungimo azimuto skale schema

Iš pat pradžių giroskopas yra ištiesinamas panaudojant apkabos mechanizmą, kuris giroskopo sukimosi ašį rankiniu būdu pastato į horizantaliąją plokštumą. Mechanizmą sudaro nuožulnusis dantratukas ir guolio rankenėlė (stipinas), kuris paklūsta tiek guolio, tiek instrumento priekinėje dalyje esančiai reguliuojamajai rankenėlei,. Pastūmus rankenėlę, nuožulnusis dantratukas susikabina su sinchronizatoriaus krumpliaračio rėmu, o tai leidžia skalei susireguliuoti pagal azimutą, sukant apkabos rankenėlę. Kartu yra pakeliamas apkabos stipinas, kuris užfiksuoja horizontaliojoje plokštumoje vidinės kardaninės pakabos rėmą bei apsaugo kardaninės pakabos rėmą ir rotorių nuo pasvirimo įrenginėjant.



1.2.67 pav. Giroskopinis skrydžio krypties (kurso) rodiklis su orine pavara: 1 – pagrindas; 2 – sinchronizatoriaus krumpliaratis; 3 – aretyro rankenėlė; 4 – aretyras; 5 – azimuto skalė; 6 – orinė tūta; 7 – išorinis rėmas; 8 – rotorius; 9 – korpusas; 10 – išorinio rėmo pusašis su fiksavimo veržle; 11 – vidinis rėmas

Apkabos rankena ištraukiama, kad atpalaiduotų giroskopą, atsitraukiant nuo krumpiaračio ir leidžiant apkabos stipinui iškristi, atlaisvinant vidinės kardaninės pakabos rėmą. Vidinė kardaninė pakaba taip pat turi būti įtvirtinta horizontaliojoje padėtyje atliekant figūrinį skraidymą, kad sumažėtų rotoriaus guoliams tenkanti didelė apkrova. Giroskopinio skrydžio krypties (kurso) rodytuvo su orine pavara tipinė konstrukcija pateikta 1.2.67 pav. Aretyras skirtas rotoriaus sukimosi ašiai horizontaliojoje padėtyje palaikyti, įvedant pagal skalę azimutą.

Elektrinės pavaros naudojimo versijoje rotorius yra kintamosios srovės variklio pavaros dalis ir sukasi apytiksliai 24 tūkst. sūkių per minutę greičiu.

Pirminis montažas atliekamas panaudojant apkabos įrenginius, tačiau paskui giroskopas sujungiamas taip, kad išlaikytų horizontalią Žemės paviršiui sukimosi ašį.

Pneumatinio krypties rodytuvo paklaidos. Pneumatinio krypties rodytuvo paklaidų priežastys:

Tikroji deviacija ir posvyris. Giroskopas – tai objektas, dėl kurio kyla šios dvi paklaidos, sukeliamos mechaninių trūkumų, tokių kaip rotoriaus (kardaninės pakabos) sistemos nežymus disbalansas, guolių trintis ir mechaninė ar elekrtoninė platumos korekcija.

Menamasis kurso kitimas. Žemės greitis (dėl jos sukimosi) ir vietos nuokrypiai (dėl giroskopo transportavimo Rytų ir Vakarų kryptimis) sukelia prielaidas paklaidoms atsirasti. Nustatyto dydžio kompensacija apskaičiuojama priklausomai nuo orlaivio atliekamų veiksmų įvairovės, esant tam tikriems neatitikimams, gali būti suprantamas kaip su kardanine pakaba susietas išsibalansavimas. Kurso dreifo rodiklis gali siekti 15,04° per valandą; dėl šios priežasties prietaisas reikalauja pakartotinio nustatymo, kuris atliekamas maždaug kas 15 min. tikrinant tiesioginių rodmenų kompaso magnetinį kursą. Tuo tarpu orlaivis, nedidindamas greičio, atlieka horizontalųjį skridimą. Kiekvienas giroskopu užfiksuotas posvyris yra koreguojamas, naudojant oro srautu valdomą korekcijos sistemą.

Kardaninės pakabos klaidos. Bet kokios orlaivio ir navigacinės sistemos ašių tarpusavio nuokrypos sukelia šias paklaidas. Šios paklaidos atsiranda tik orlaiviui manevruojant, t. y. kylant, žemėjant, pakrypstant, bet vos atsistato horizontalusis skrydis – jos dingsta.

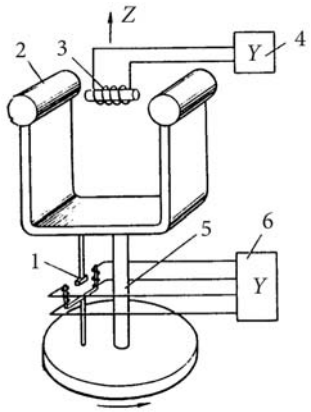
Krypties indikatoriaus naudojimas. Mažesniuose ir senesniuose orlaiviuose krypties indikatorius visų pirma yra kurso nustatymo prietaisas, skirtas nustatytam skrydžio kursui išlaikyti. Tačiau dėl egzistuojančių įvairių kurso kitimo paklaidų su šį prietaisą reikėtų naudoti ypač apdairiai. Svarbu atkreipti dėmesį, jog giroskopinio skrydžio krypties rodytuvo kursas turi sutapti su magnetinio kompaso kursu. Suderinimą reikia atlikti prietaiso rankenėle. Pasiruošimo skrydžiui metu riedant pakilimo link, siekiant užtikrinti, kad giroskopo kurso kitimo rodmenys stipriai nesiskirtų, yra privalomi periodiški dviejų rodmenų palyginimai. Skrydžio metu giroskopinis skrydžio krypties rodytuvas taip pat turi būti tikrinamas dar kartą ir pakartotinai nustatomas maždaug kas 15 ar 20 min. pagal magnetinį kompasą, orlaiviui esant pastovaus horizontaliojo skrydžio režime.

1.3. Inerciniai įrenginiai

1.3.1. Kampinių pagreičių davikliai

Kartu su giroskopiniais kampinių greičių davikliais, kurių pagrindinis elementas yra greitai besisukantis mechaninis rotorius, žinomi įtaisai, atliekantys kampinio greičio matavimo funkcijas, bet neturintys rotoriaus. Tokiems įtaisams priskiriami inerciniai davikliai: vibracinis ir lazerinis giroskopai.

Suprastinta ***vibracinio giroskopo*** (girotrono) schema pateikta 1.3.1 pav. Prietaiso pagrindą sudaro kamertonas *2*, kurio dvi kojelės sužadinamos priešingos fazės virpesiais pasitelkus elektromagnetinę vibracinę pavarą *3*. Vibracinė pavara *3* maitinama kintamosios srovės įtampa iš stiprintuvo *4*. Kamertono rankenėlė pagaminta kaip sukamasis strypas *5*, kurio laisvasis galas įtvirtintas prietaiso pagrinde.

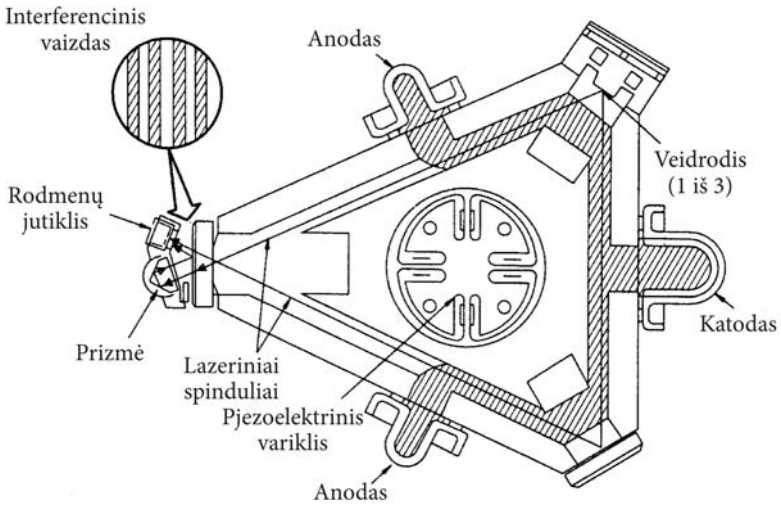


1.3.1 pav. Vibracinio giroskopo schema

Jei vibruojantysis kamertonas sukasi aplink ašį *Z*, tai kojelėms tolstant vienai nuo kitos atsiranda jėgos, siekiančios sulėtinti kojelių kraštuose esančių svorių posūkio greitį. Strypas *5* užsukamas priešinga prietaiso pagrindo sukimuisi kryptimi. Artėjant kojelėms, strypą *5* užsukančių jėgų kryptys priešingos. Kadangi, vykstant harmoninėms kamertono vibracijoms, jo kojelės periodiškai priartėja ir nutolsta, tokiu pat periodiškumu strypą *5* veikia sukamosios jėgos. Atsiradę dėl tokio poveikio sukamieji kamertono šakutės virpesiai jo pagrindo atžvilgiu keičiami į elektrinį signalą elektromagnetiniu keitikliu *1*. Keitiklio harmoniniai signalai stiprinami stiprintuve *6*. Šių signalų amplitudė proporcinga prietaiso pagrindo sukimosi kampiniam greičiui.

Lazerinio giroskopo sudarymo ir veikimo principas paaiškinamas 1.3.2 pav. Lazerinį giroskopą sudaro trys trikampiu išdėstyti optiniai vamzdeliai, jais gali sklisti lazerio sukeliamas šviesos spindulys. Vamzdeliai sudaro lygiakraštį trikampį, kurio viršūnėse yra veidrodėliai (1.3.2 pav.). Trikampio pagrindo viduryje – lazerinio generatoriaus katodas, o kraštinėse – anodai. Katodas ir anodai yra helio arba neono dujose. Katodas generuoja du šviesos spindulius ir siunčia juos priešingomis kryptimis į kampuose esančius veidrodžius. Spinduliai sklinda uždaruoju trikampio pavidalo keliu, atsispindėdami nuo veidrodžių dviem kryptimis: vienas pagal laikrodžio rodyklę, kitas –priešingai. Nuo pirmųjų veidrodžių atsispindi visa šviesa. Trečiosios trikampio viršūnės veidrodis yra pusiau skaidrus, pro jį praeina dalis vieno spindulio šviesos ir patenka į optinį jutiklį (fotoelementą). Už šio veidrodžio yra kampinė optinė prizmė, kuri nukreipia antrąjį spindulį į jutiklį. Šio jutiklio signalas, proporcingas abiejų spindulių bangų ilgio skirtumui, siunčiamas į matavimo schemą.

Kai giroskopas nejuda, abu spinduliai nueina vienodą kelią iki jutiklio. Jų bangų ilgio skirtumas lygus nuliui ir jutiklyje kyla spindulių interferencija, vizualiaipasireiškianti, kaip tamsių ir šviesių pasikartojančių linijų grupė. Jutiklis matuoja šių linijų tarpusavio išsidėstymo padėtį. Jei giroskopas (trikampis) sukamas apie ašį, statmeną lazerio plokštumai, vienas spindulys nueis didesnį kelią negu ramybės būsenoje, o kitas mažesnį. Tada jutiklyje interferencinės linijos pasislinks į kairę ar dešinę, proporcingai giroskopo sukimosi greičiui. Linijų poslinkio dydis (maždaug $1\times10^{-8}m$) matuojamas jutiklio šviesos diodu, kuris šviesos linijų poslinkį keičia į elektros srovę, proporcingą girosokopo kampiniam greičiui.



1.3.2 pav. Lazerinio giroskopo schema

Vienu tokiu giroskopu galima išmatuoti orlaivio posūkį apie vieną jo ašį. Norint išmatuoti orlaivio posvyrį, polinkį ir pokrypį reikia turėti tris tokius giroskopus. Visi trys giroskopai ir trys tiesinių pagreičių matuokliai įstatomi į bendrą korpusą. Jie sudaro inercinį padėties nustatymo įrenginį (IRU), kuris nejudamai įtaisomas orlaivyje.

Sukant giroskopą lėtai, abiejų šviesos spindulių dažniai tarsi „sukimba“ ir beveik nesiskiria vienas nuo kito. Norint matuoti mažus orlaivio posūkio apie ašis greičius, pjezoelektrinis varikliukas virpina sukamąjį lazerio korpusą. Šviesos linijų poslinkis, atsiradęs dėl vibracijos ir sukant lazerį, susisumuoja ir matavimų tikslumas pagerėja. Varikliuko veikimas girdimas ir jaučiamas, palietus IRU korpusą.

1.3.2. Tiesinių pagreičių davikliai

Orlaiviui manevruojant, atsiranda tiesiniai pagreičiai, veikiantys orlaivio valdymą, inercinę orlaivio navigaciją ir lemiantys perkrovas.

Šie pagreičiai nustatomi tiesinių pagreičių davikliais. Šių daviklių signalai įspėja pilotą apie ribines leistinąsias perkrovas arba patenka į automatizuotą pavojingų režimų apribojimo sistemą. Orlaivio valdymo horizontaliojoje plokštumoje charakteristikoms pagerinti į krypties vairo valdymo kontūrą įvedami signalai, proporcingi skersiniams orlaivio pagreičiams. Inercinė orlaivio navigacija atliekama matuojant pagreičių horizontaliojoje plokštumoje dėmenis ir juos integruojant. Tikslas – nustatyti skrydžio kelio greitį ir orlaivio vietą kelyje.

Tiesinių pagreičių davikliai sudaromi remiantis ***inerciniu*** metodu, kurio esmė ta, kad matuojama inercinės masės sukeliama jėga, masei judant tiesiniu pagreičiu. Šiuo principu sudaryti tiesinių pagreičių davikliai vadinami ***akcelerometrais.***

Priklausomai nuo jėgos matavimo būdo akcelerometrai yra su mechaninėmis ir „elektrinėmis“ spyruoklėmis. „Elektrinė“ spyruoklė – tai elektromechaninis įrenginys, sukeliantis jėgos momentą, kompensuojantį dėl matuojamojo pagreičio atsirandantį inercinį momentą.

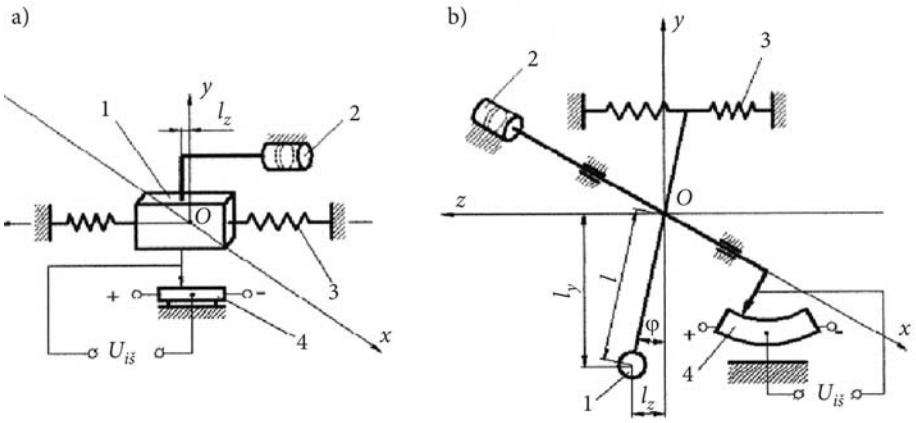
Pagal pakabos (masės) reakcijos jėgos ir išėjimo signalo priklausomybę akcelerometrai skirstomi į paprastuosius ir integruojančiuosius. Paprastojo akcelerometro išėjimo signalas proporcingas orlaivio judėjimo pagreičiui, o integruojančiojo – orlaivio judėjimo greičiui.

Pagal inercinės masės judėjimo pobūdį akcelerometrai esti ašiniai ir švytuoklės tipo (švytuokliniai). Ašiniuose akcelerometruose inercinė masė juda tolydžiai (tiesiškai), švytuokliniuose – sukamuoju judesiu.

Pagal inercinės masės pakabos būdą akcelerometrai skiriami į daviklius su kietąja, hidrauline, aerodinamine, magnetine ir kitokia pakaba.

Akcelerometrų veikimo principą panagrinėsime analizuodami paprastuosius ašinius ir švytuoklės tipo prietaisus su mechanine spyruokle ir kietąja pakaba.

Ašinio akcelerometro jautrusis elementas (1.3.3 pav., a) – inercinė masė *1*, pritvirtinta prietaiso korpuse dviem spyruoklėmis *3*. Ašis *Oz* vadinama akcelerometro ***jautrumo ašimi***. Jei pagreičio nėra, akcelerometro inercinė masė yra vidurinėje padėtyje. Atsiradus orlaivio pagreičiui išilgai ašies *Oz*, masė *1* pasislenka dydžiu l_z tiek, kol inercijos jėgą, atsiradusią veikiant pagreičiui, atsveria spyruoklės priešingo veikimo jėga. Masės poslinkio dydis, proporcingas pagreičiui, fiksuojamas elektrinio signalo pavidalu potenciometre *4*. Inercinės masės virpesiams slopinti pereinamuoju režimu prietaise yra slopintuvas *2*. Į pagreičius pagal ašis *Ox* ir *Oy* prietaisas nereaguoja, nes inercinės masės poslinkį pagal šias ašis riboja akcelerometro korpusas.



1.3.3 pav. Akcelerometrų sudarymo schemos:
a – ašinis; b – švytuoklinis

Švytuoklinio akcelerometro schema pateikta 1.3.3 pav., b. Jautrusis akcelerometro elementas čia yra inercinė masė *1* švytuoklės tipo pakaboje. Nesant pagreičio, švytuoklė yra neutralioje padėtyje, atitinkančioje įtemptų spyruoklių *3* padėtį. Jei orlaivis juda tiesiniu pagreičiu išilgai ašies *Oz*, švytuoklė palinksta kampu φ, kuriam esant inercijos pagreičio ir spyruoklės standumo jėgos tampa lygios. Švytuoklės polinkio kampas φ, proporcingas matuojamam inercijos pagreičiui, fiksuojamas potenciometru *4*.

Akcelerometrų paklaidos. ***Metodines*** akcelerometrų paklaidos susidaro dėl kampinių greičių ir pagreičių bei pagreičių pagal skersines ašis.

Akcelerometrų vadinamosios ***prietaiso*** paklaidos atsiranda dėl:

– netikslaus nulio nustatymo ir spyruoklių histerezės;

– jautrumo slenksčio, t. y. mažiausiojo tiesinio pagreičio, kurį prietaisas gali nustatyti;

– prietaiso perdavimo koeficiento nestabilumo;

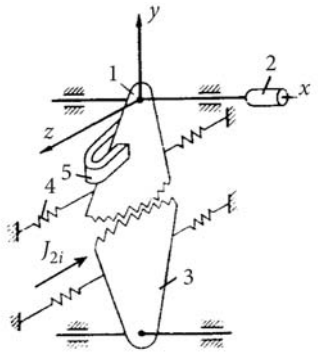
– konstrukcijos elementų inertiškumo.

Paklaidoms mažinti atitinkamai parenkamas akcelerometro slopinimo koeficientas ir savasis akcelerometro dažnis, kuris turi būti daugiau kaip dešimt kartų didesnis už matuojamųjų pagreičių maksimalųjį pasikartojimo dažnį. Švytuoklinio akcelerometro jautrumo slenkstis gerokai mažesnis negu ašinio. Minimali nustatomo pagreičio reikšmė priklauso nuo trinties dydžio.

Akcelerometrų konstrukcijos. Atakos kampų ir perkrovų automate ribinėms leistinosioms ***vertikaliosioms*** perkrovoms, susidarančioms orlaiviui manevruojant, nustatyti naudojamas perkrovų daviklis PD. Jautrusis daviklio elementas yra ***pasvaras***, judantis kreipiamosiomis išilgai ašies, statmenos išilginei ir skersinei orlaivio ašims. Pasvaras įtvirtintas tarp dviejų cilindrinių spyruoklių, kurias pagal ilgį riboja daviklio kampas. Spyruoklių standumas parenkamas priklausomai nuo matuojamųjų perkrovų dydžių diapazono. Pasvaras sujungtas su potenciometrų šliaužikliais. Potenciometrai pritvirtinti ant daviklio korpuso. Perkrovų daviklis yra paprastas ašinis akcelerometras su mechanine spyruokle ir inercinės masės kietąja pakaba. Pasvaro inercijos jėgų momentas, proporcingas matuojamos perkrovos dydžiui, perstumia pasvarą kreipiamosiomis. Judant pasvarui šliaužikliai slysta per potenciometrus, ir nuo jų lanksčiais laidais perduodamas signalas, proporcingas veikiančiai perkrovai. Šliaužiklius nuo mechaninių pažeidimų apsaugo reguliuojamosios atramos. Jos nustato pasvarų poslinkio diapazoną. Atramos reguliuojamos taip, kad pasvaras atsiremtų į jas, kai perkrovos 10 % viršija maksimaliąsias. Vidinė daviklio korpuso ertmė pripil-

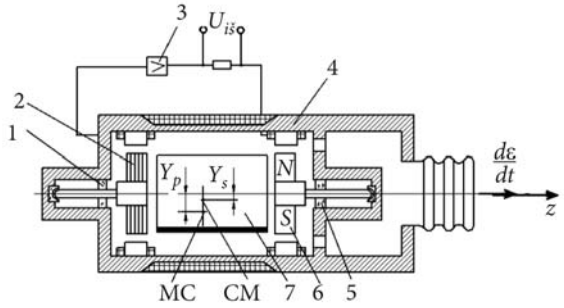
dyta alyvos, kad sumažėtų trintis ir padidėtų laisvųjų judesių slopinimas. Elektrinis potenciometrų maitinimas ir informacinių signalų perdavimas atliekami hermetizuotais įvadais.

Daviklį sudaro dviejų rutuliniuose guoliuose pakabintų ir esančių vertikaliojoje padėtyje spyruoklių *4* porų palaikomų švytuoklių (*1* ir *3*) sistema (1.3.4 pav.). Švytuokles tarpusavyje sieja krumpliaračių sankaba. Pagal tokią kinetinę schemą švytuoklė palinksta tik veikiant pagreičiui j_z, kadangi vertikaliojo pagreičio j_y poveikį panaikina krumpliaračių sankaba. Signalas, proporcingas matuojamajam pagreičiui, perduodamas indukcinio daviklio *2*, kurio rotorius pritvirtintas ant viršutinės švytuoklės ašies, o statorius – daviklio korpuse. Saviesiems sistemos virpesiams slopinti prie viršutinės švytuoklės tvirtinama speciali plokštelė, pagaminta iš raudonojo vario ir įterpta į specialaus elektromagneto *5* magnetolaidžio plyšį. Elektromagnetas *5* maitinamas pastoviąja srove. Daviklis turi aretyrą (1.3.4 pav. neparodytas).



1.3.4 pav. Horizontaliųjų pagreičių daviklio kinetinė schema

Precizinis akcelerometras su elektrine spyruokle ir hidrauline inercinės masės pakaba (1.3.5 pav.) plačiai naudojamas inercinėse orlaivių navigacinėse sistemose. Judamoji akcelerometro dalis – hermetizuota cilindrinė plūdinė kamera (plūdė) *7* su joje įtvirtintais kampų daviklio *2* ir jėgos momento daviklio *6* rotoriais. Plūdė *7* pakabinta akmeninėse atramose *5*, hermetizuotame korpuse *4*, pripildytame sunkaus skysčio. Vidutinis plūdės tankis parenkamas apytikriai pagal skysčio tankį.



1.3.5 pav. Precizinio akcelerometro su elektrine spyruokle ir hidrauline pakaba konstrukcinė schema

Plūdė *7* yra neutralaus plūduriavimo būsenos, nes jos svorio jėgą atsveria skysčio hidrostatinio slėgio jėgos. Todėl akmeninės atramos *5* iš esmės nėra apkrautos svorio ir inercijos jėgų, atsirandančių akcelerometrui (kartu su orlaiviu) judant su pagreičiu. Akcelerometro plūdinės kameros *7* masių centras *MC* pasistūmėjęs ašies *z* sukimosi atžvilgiu dydžiu y_p, o jos metacentras *CM* (išspausto skysčio tūrio masių centras) – dydžiu y_s.

Jei akcelerometras juda su pagreičiu $\vec{v}_x$ kryptimi, statmena pavaizduotajai 1.3.5 pav., tai aplink plūdės *7* ašį *z* veikia inercinis momentas:

$$M_{z_{in}} = \frac{G_p}{g} y_p \vec{v}_x + \frac{G_s}{g} y_s \vec{v}_x , \qquad (1.3.1)$$

čia G_p – plūdės svorio jėga; g – laisvojo kritimo pagreitis; G_s – plūdės išspausto skysčio svorio jėga.

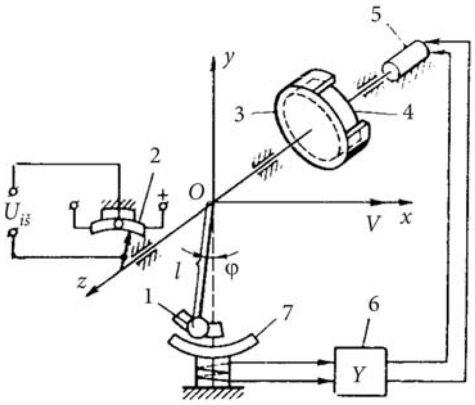
Esamu atveju $G_p = G_s = G$. Tada:

$$M_{z_{in}} = \frac{Gl}{g}\vec{v}_x l = y_p - y_s ,3 \qquad (1.3.2)$$

čia *Gl* – akcelerometro plūdinės kameros švytavimo savybė.

Inercinio momento $M_{z.in}$ veikiama plūdė *7* pasisuka aplink ašį *z*, ir kampo daviklis *2* į stiprintuvą *3* perduoda elektrinį signalą, proporcingą kameros ***posūkio kampui* ε.** Signalas iš stiprintuvo *3* paveikia momento daviklį *6*, šis sukuria jėgos momentą, proporcingą kampui ε („elektrinė spyruoklė“). Daviklio *6* sukeltas momentas subalansuoja inercinį momentą ir stiprintuvo *3* išėjime fiksuojamas signalas, atitinkantis veikiantį pagreitį $\vec{v}_x$.

Integracinio švytuoklinio akcelerometro su elektrine spyruokle ir kietąja pakaba kinetinė schema pateikta 1.3.6 pav.



1.3.6 pav. Integracinio akcelerometro kinetinė schema

Akcelerometrą sudaro: inercinė masė *1*, potenciometras *2*, elektrai laidus dangtelis *3*, magnetas *4*, elektrinis variklis *5*, stiprintuvas *6* ir indukcinis kampo daviklis *7*. Linkstant švytuoklei *1*, dėl pagreičio $\vec{v}_x$, daviklio *7* signalas per stiprintuvą *6* patenka į variklį *5*, ant kurio ašies pritvirtintas magnetas *4*. Veikiant signalui, sukasi variklio ašis, ir nuo indukcinio daviklio dangtelyje *3* indukuojasi sukūrinės srovės, kurių sąveika su magneto *4* lauku sukelia švytuoklę veikiantį sukimo momentą $M_{z.\,suk}$.

Sukimo momentas, proporcingas magneto sukimosi greičiui ω_m, t. y. $M_{z.suk} = k\,\omega_m$. Šis momentas išbalansuoja švytuoklės inercinį momentą $M_{z_{in}} = m_m l\vec{v}_x$. Taigi nusistovėjus pagreičiui, kai v_x^0 = const, variklis sukasi pastoviuoju greičiu, o momentas $M_{z\,suk}$ subalansuoja momenta $M_{z_{in}} = k\omega_m^0 = m_m l\vec{v}_x^0$.

Taigi:

$$y_m = \int_0^t \omega_m^0 dt = \frac{m_m l}{k}\int_0^t \vec{v}_z^0 dt = \frac{m_m l}{k} v_x^0 . \qquad (1.3.3)$$

Išmatavus švytuoklės posūkio kampą, gali būti nustatytas orlaivio, kuriame yra akcelerometras, judėjimo greitis.

Pagrindiniai eksploatacijos metu kontroliuojami tiesinių pagreičių daviklių parametrai yra jautrumo slenkstis ir statinė charakteristika.

Akcelerometro jautrumo slenkstis nustatomas, pavyzdžiui, pagal sukamojo stalo platformos, ant kurios pritvirtinamas tiesinio pagreičio daviklis, mažiausią posūkio kampą α^{min}, kuriam esant pastebimas išėjimo signalo pokytis. Jautrumo slenksčio dydis j^{min} apskaičiuojamas pagal formulę $j^{min} = g\,\alpha^{min}$, čia *g* – laisvojo kritimo pagreitis, α^{min} – platformos posūkio kampas.

Statinė charakteristika gali būti nustatyta įdėjus tiesinių pagreičių daviklį į centrifugą. Kadangi tokiu atveju $U_{iš} = -k_a\omega_c^2 l$ (čia ω_c – centrifugos sukimosi greitis; *l* – daviklio įtvirtinimo petys), tai pasirinkus įvairius sukimosi greičius ω_c ir matuojant išėjimo signalą $U_{iš}$ galima nustatyti statinę akcelerometro charakteristiką.

1.4. Magnetinai kompasai

1.4.1. Magnetizmo principai

Tiesioginio nuskaitymo magnetiniai kompasai – pirmieji orlaiviuose panaudoti navigaciniai prietaisai. Jų paskirtis buvo rodyti orlaivio skrydžio kryptį Žemės magnetinio meridiano atžvilgiu. Šiuolaikinių orlaivių navigaciniai įtaisai panašūs, tačiau tokia krypties informacija yra tiksliau nustatoma per nuotolinio nuskaitymo kompasą ir skrydžio valdymo sistemas.

Paprastai tiesioginio nuskaitymo kompasai yra autonominiai prietaisai. Šių kompasų veikimo principas pagrįstas Žemės magnetizmu, t. y. reakcija tarp Žemę supančio magnetinio lauko ir tinkamai jame orientuoto magnetinio elemento.

Magnetinės savybės (1.4.1 pav.). Iš pat pradžių panagrinėsime tris principines pastoviojo magnetinio elemento savybes:

– pritraukia geležies ir plieno daleles;

– kai yra galimybė judėti horizontaliojoje plokštumoje, trauka pasireiškia priešinguose galuose;

– visada nusistovi ramybės būsenoje pagal išilginę ašį, nukreiptą Šiaurės–Pietų kryptimi.

Antroji ir trečioji savybės susietos su vadinamaisiais magneto poliais. Magnetinio elemento galas, atsisukęs į šiaurę, vadinamas ***šiauriniu magneto poliumi N***, o galas, atsisukęs į pietus, vadinamas ***pietiniu magneto poliumi S***.

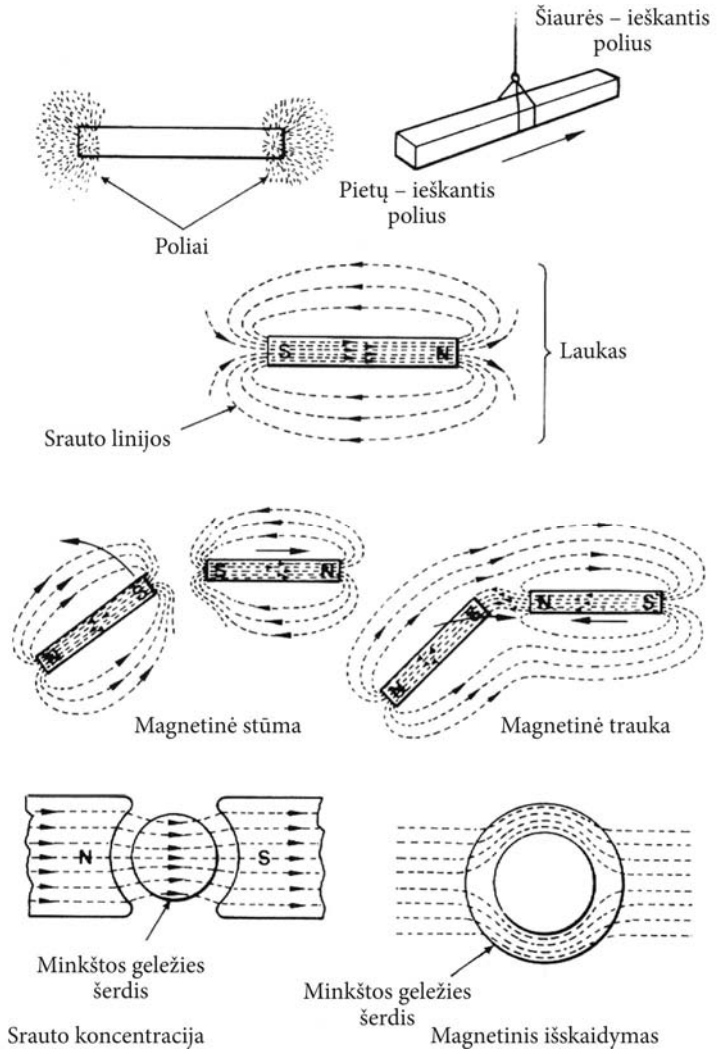
Kai du tokie magnetai yra sudedami kartu taip, kad šiauriniai ar pietiniai poliai būtų vienas prieš kitą, tai sukeliamos priešingos krypties jėgos, stumiančios magnetus vieną nuo kito. Kai magnetus apsukame ir šiaurinis polius yra prie pietinio polio tai vėl sukuriamos jėgos, tik šį kartą jos trauks magnetus vienas prie kito. Veikiančios tarp dviejų magneto polių jėgos stiprumas kinta atvirkščiai kvadratinei šakniai iš atstumo tarp jų. Vieta, kurioje ši jėga atsiranda, yra žinoma kaip magnetinis laukas. Toks laukas turi magnetinį srautą, kuris gali būti apibūdintas srauto linijų kryptimi ir tankiu. Magnetinio lauko srauto linijų įprastinė kryptis yra iš šiaurinio polio į pietinį polių. Linijos yra uždaros ir ištisinės taip, kad magneto viduje jų kryptis būtų iš pietinio į šiaurinį polių. Jei du magnetiniai laukai yra suartinami, tai jų srauto linijos nekerta viena kitos, bet iškraipo magnetinio lauko struktūrą, tačiau lieka uždaros. Magnetinis srautas žymimas raide Φ, jo vienetas yra ***vėberis*** (**Wb**). Srauto vienetų kiekis, tenkantis vienetiniam erdvės plotui, išreiškiamas srauto linijų tankiu, yra žinomas kaip magnetinis ***srauto tankis*** (**B**). Magnetinio srauto tankis vertinamas vėberiais kvadratiniame metre arba ***teslomis*** (**T**). Magnetinis srauto stiprumas priklauso nuo medžiagos, kurioje jis sukuriamas, elektrinių ir magnetinių savybių, todėl daug lengviau sukuriamas magnetinėse medžiagose nei ore. Visos medžiagos turi savybę, kuri apibūdinama kaip pasipriešinimas magnetinio srauto sukūrimui, ji yra lygiavertė elektrinės grandinės varžui. Iš to išplaukia, kad magnetinio srauto tankis magnetinėse medžiagose bus didesnis nei jas supančiame ore.

Magnetinio lauko stiprumas *H*, arba magnetinio lauko intensyvumas, kiekviename jo taške yra nustatomas jėga *F*, veikiančia tame magnetinio srauto taške. Ši jėga priklauso nuo magnetinio srauto tankio:

$$H = \frac{F}{\Phi}. \qquad (1.4.1)$$

Taigi magnetinio lauko stiprumo vienetas *H* yra lygus jėgos *F* dydžiui, tenkančiam vienam magnetinio srauto tankio vienetui (N/Wb). Analogiškas vienetas, artimesnis elektros inžinieriams, yra amperai per metrą (A/m). Taigi 1 N/Wb = 1 A/m.

Magnetinis momentas. Magneto ***magnetinis momentas*** – tai polinkis sukti arba būti sukamam kito magneto. Kuriant orlaivių kompasus, svarbu, kad šio momento stiprumas būtų pakankamai didelis ir magnetinės kurso sistemos greitai reaguotų į veikiančią magnetinio lauko jėgą. Turėdamos apskaičiuotą ilgį ir magneto poliaus stiprumą, jos būtų gana vertingos.



1.4.1 pav. Pagrindinės magnetinio lauko savybės

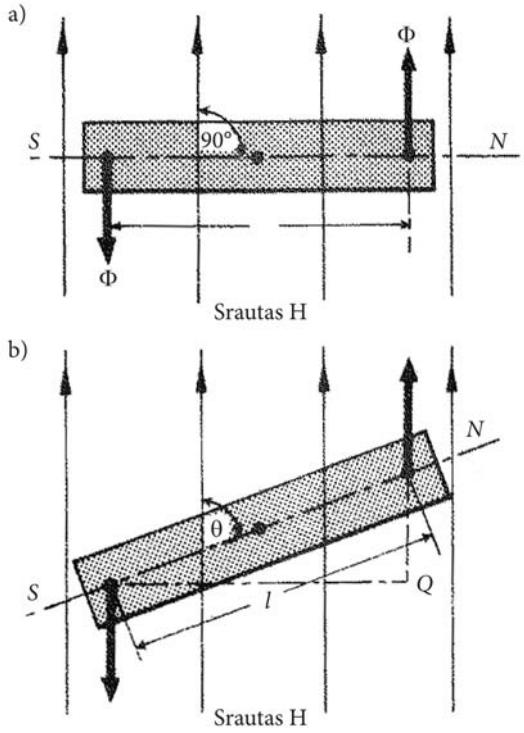
1.4.2 pav. daroma prielaida, kad pavaizduoto magneto su sukimosi centru poliaus magnetinio lauko srautas yra Φ, magneto ašies ilgis – *l*. Tada magnetinis momentas *m* yra lygus poliaus magnetinio srauto ir magneto ilgio sandaugai $m = l\Phi$. Jei magnetas orientuotas stačiuoju kampu tolydinio magnetinio lauko srauto *H* krypties atžvilgiu, tai laukas bus iškraipomas, kai kirs magnetą. Atsiras pasipriešinimas iškraipymui, laukas bandys traukti magnetą ir ištiesinti jį pagal savo kryptį. Kiekvienas magneto polius patirs jėgą $F = \Phi H$ ir kadangi jėgos veiks magneto polius priešingomis kryptimis, jos susisumuos ir padvigubės. Šiuo atveju sukimo momentas *M* yra kelių veiksnių suma ir lygus veikiančiųjų jėgų bei atstumo tarp jų sandaugai: $M = l\Phi H$; bet $l\Phi = m$, taigi $M = mH$.

Taigi aišku, kad kuo didesnis magnetinio poliaus sukeliamo lauko srauto tankis ir ilgesnis jame patalpintas magnetas, tuo didesnis bus magneto polinkis pasisukti į padėtį atitinkančią supančio magnetinio lauko kryptį.

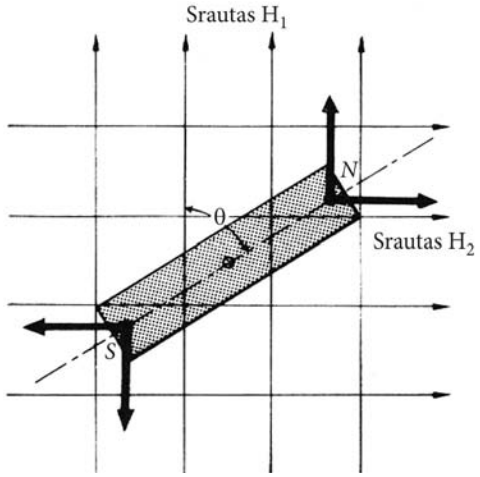
1.4.2 pav., b magnetas orientuotas kampu θ tolydinio magnetinio lauko srauto *H* krypties atžvilgiu. Jėga, veikianti kiekvieną magneto polių, vis tiek yra proporcinga ΦH, tačiau atstumas tarp jėgų SQ. Dabar $SQ/SN = SQ/l = \sin\theta$, taigi $SQ = l\sin\theta$. Išeina, kad sukimo momentas, veikiantis magnetą kampu θ lygus $l\Phi H\sin\theta$ arba $mH\sin\theta$.

Magnetas kintamosios krypties magnetiniame lauke. 1.4.3 pav. parodytas magnetas, esantis tolydiniame magnetiniame lauke H_1 ir tolydiniame pasuktame lauke H_2 (jis pasuktas tam tikrų kampų H_1 atžvilgiu). Kai magnetas yra kampu θ lauko H_1 atžvilgiu, kaip parodyta, tai sukimo momentas dėl H_1 įtakos yra $mH\sin\theta$. Sukimo momentas dėl H_2 įtakos yra $mH_2\cos\theta$. Taigi magnetas bus pusiausvy-

roje, kadangi bus veikiamas priešingos krypties vienodo dydžio sukimo momentų $mH_1 \sin\theta = mH_2 \cos\theta$. Taigi magnetą pasukantis laukas bus $H_2 = H_1 \tan\theta$.



1.4.2 pav. Magnetinis momentas, sukeliamas įdėjus pastovųjį magnetą į tolydinį magnetinį lauką: a – magnetas, orientuotas skersai magnetinėms linijoms; b – magnetas, orientuotas kampu θ magnetinėms linijoms



1.4.3 pav. Magnetas kintamosios krypties lauke

Sustabdyto magneto svyravimų periodas. Jei sustabdytas magnetas nukreipiamas nuo jo rimties padėties ir yra magnetiniame lauke, kuriuo yra veikiamas, – jis patiria keletą svyravimų pradinės padėties atžvilgiu. Jeigu nukreipiantis poveikis pašalinamas ir magnetas neslopinamas, jis pradeda svyruoti atgal ir į priekį apie pusiausvyros padėtį ir galų gale nusistovi rimties būsenoje. Laikas nuo magneto svyravimo vienos padėties iki kitos ir atgal yra vadinamas magneto periodu.

Kai magnetas pamažu artėja į rimtį, tai svyravimų amplitudė palengva mažėja, bet periodas išlieka pastovus (jis negali būti sumažintas reguliuojant amplitudę). Magneto svyravimo periodas priklauso nuo jo formos, dydžio ar masės (veiksnių, kurie veikia inertiškumo momentą), magnetinio momento ir lauko stiprumo, kuriame jis svyruoja. Periodas didėja, kai didėja magneto masė, ir trumpėja, kai mažėja lauko stiprumas.

Magneto svyravimai dėl veikiančio magnetinio lauko įtakos yra labai panašūs į tuos, kurie atsiranda įprastinėje pasvaro veikiamoje svyruojančioje švytuoklėje. Tokios švytuoklės periodas:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}, \tag{1.4.2}$$

čia l – švytuoklės ilgis; g – laisvojo kritimo pagreitis.

Kai magnetas dėl magnetinio momento m pasukamas kampu θ kaip parodyta, sukimo momentas T, grąžinantis jį į pusiausvyros poziciją yra $mH\sin\theta$. Jei svyruojančiojo magneto inercijos momentas I yra apie svorio centrą ant ašies, statmenos jo ilgiui, jos kampinis pagreitis bus:

$$\alpha = \frac{M}{I} = \frac{mH\sin\theta}{I}. \tag{1.4.3}$$

Jei poslinkis yra mažas, tai $\sin\theta$ ir θ pastebimai nesiskiria, ir $mH\sin\theta/I$ gali būti parašytas kaip mH/I ir yra pastovus. Magneto svyravimo judesiui periodas bus:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{mH}}. \tag{1.4.4}$$

Kietoji ir minkštoji geležis. „Kietasis“ ir „Minkštasis“ terminai naudojami magnetinių medžiagų skirtumui apibūdinti pagal jų gebėjimą įsimagnetinti. Tokie metalai, kaip kobaltas arba legiruotasis plienas, yra kieti, nes juos sunku įmagnetinti, tačiau įmagnetinti jie išlaiko šią būseną ilgą laiką. Metalai, kuriuos lengva įmagnetinti (pavyzdžiui, silicio-geležis) paprastai lengvai praranda magnetinę būseną, kai tik pašalinama magnetinė jėga, ir klasifikuojami kaip minkšti.

Šie terminai taip pat naudojami klasifikuojant orlaiviuose atsirandančius efektus, detaliau šis dalykas nagrinėjamas kitame skyriuje.

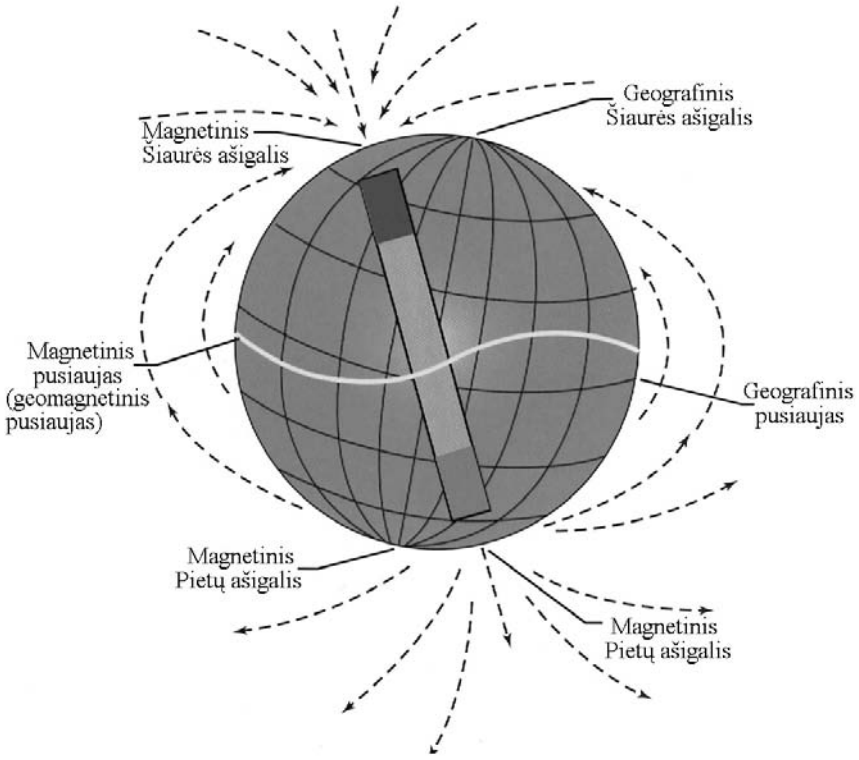
1.4.2. Žemės magnetinis laukas ir jo savybės

Žemės paviršius yra apgaubtas silpno magnetinio lauko, kuris koncentruojasi į du magnetinius polius, esančius netoli Šiaurinio ir Pietinio Žemės ašigalių. Todėl, aišku, kad laisvai pakabintas magnetas kiekvienoje Žemės dalyje pasisuks tam tikra kryptimi, kuri priklausys nuo esamos magneto vietos Žemės paviršiuje. Orlaivis, skrendantis pagal magneto kryptį, paliks įsivaizduojamą liniją, vadinamą magnetiniu meridianu, kuris parodytas 1.4.4 pav.

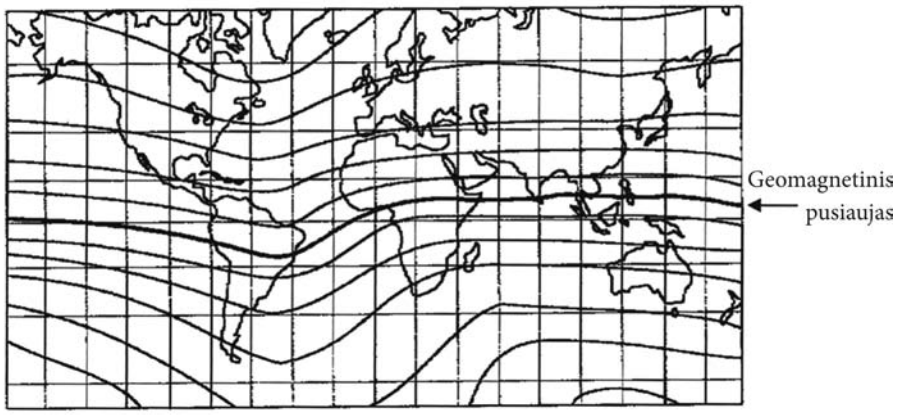
Pasirodo, kad Žemės magnetinis laukas yra panašus į tą, kurio tikimasi ant paviršiaus, jei trumpas, bet stipriai įmagnetintas strypas bus centre (1.4.4 pav.). Tai iš dalies paaiškina tai, kad magnetiniai poliai yra gana didelės teritorijos dėl į išorę sklindančių jėgos linijų, nuo kurių taip pat priklauso ir lauko kryptis horizontaliojoje pusiaujo zonoje 1.4.5 pav. Deja, iki šiol magnetinio Žemės lauko šaltinis yra nežinomas, bet daroma prielaida, kad Žemės centre yra magnetinis strypas, kuris yra geras pagalbininkas, norint įsivaizduoti Žemės magnetinį lauką.

Taigi Žemė – tai didžiulis magnetas su magnetiniais poliais, kurie yra netoli nuo geografinių polių. Paprasčiausias Žemės geomagnetinio lauko modelis gali būti pateiktas kaip vienalyčio įmagnetinto rutulio magnetinis laukas, kurio magnetinio momento M vektorius yra Žemės centre ir išdėstytas 11,5° kampu jos sukimosi ašies atžvilgiu.

Žemės magnetinis laukas skiriasi nuo įprastinio magneto kelias aspektais. Didžiausias magnetinis intensyvumas yra ne magnetiniuose poliuose (teoriškai taip turėtų būti), bet atsiranda keturiose kitose vietose – po dvi vietas prie kiekvieno polio žinomose kaip magnetinai židiniai (1.4.6 pav.). Be to, poliai patys pastoviai keičia savo pozicijas kiekviename Žemės paviršiaus taške, lauke, kuris yra nesimetriškas ir periodiškai ar nereguliariai kinta.



1.4.4 pav. Žemės geomagnetinio lauko modelis

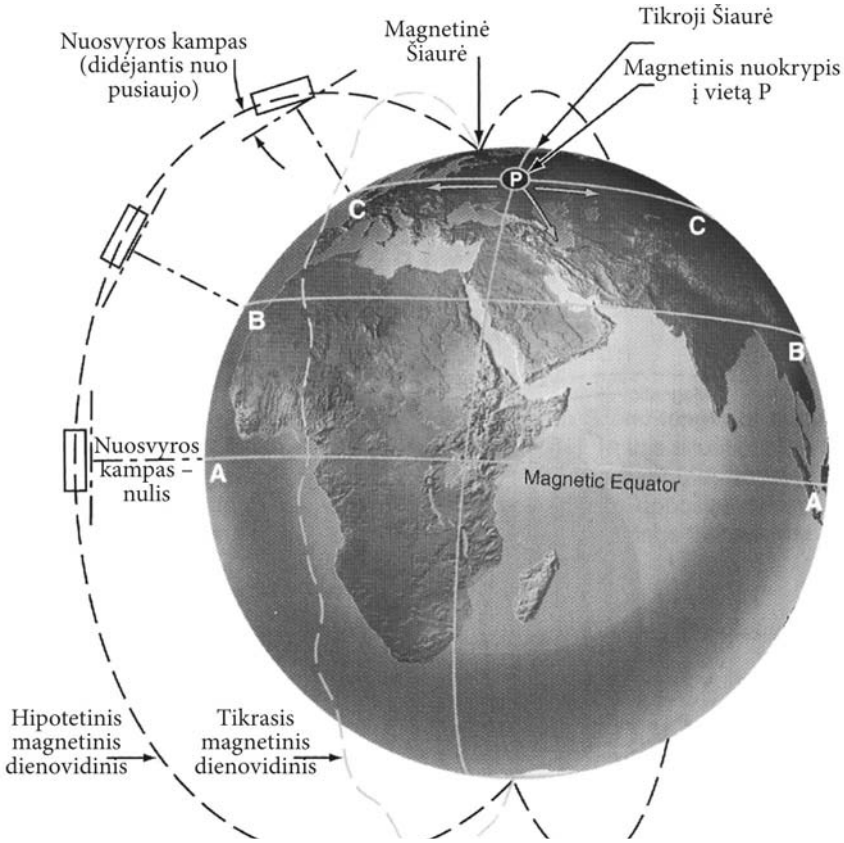


1.4.5. Geomagnetinio pusiaujo linija

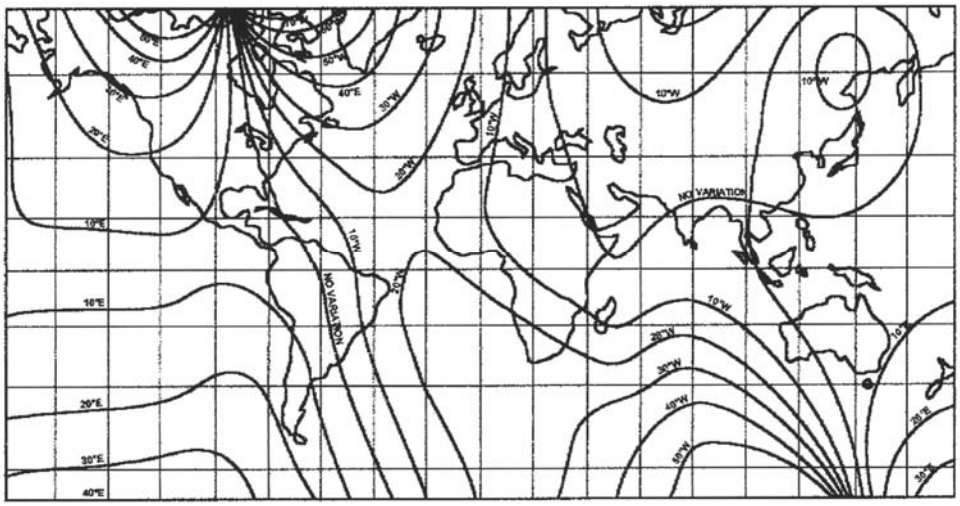
Magnetinė variacija. Žemės meridianai ir paralelės sudarytos atsižvelgiant į geografinį Šiaurės ir Pietų polių, o magnetiniai meridianai ir paralelės – atsižvelgiant į magnetinius polius. Jei žemėlapis atvaizduoja tikruosius ir magnetinius meridianus, tai pastebėsime, kad jie kerta vienas kitą įvairiais kampais, svyruojančiais nuo 0° iki 180° priklausomai nuo esamos vietos Žemėje (1.4.7 pav.).

Horizontalusis kampas tarp tikrojo ir magnetinio meridiano kiekvienoje vietoje yra žinomas kaip magnetinė variacija ar ***deklinacija***. Kai magnetinio meridiano kryptis nukrypsta į kairę nuo tikrojo meridiano kiekvienoje vietoje, tai sakoma, kad variacija yra vakarinė. Kai nukrypsta į dešinę, tai sakoma, kad variacija yra rytinė. Ji kinta nuo 0° išilgai linijų, kur magnetiniai ir tikrieji meridianai eina iki 180° vietose tarp tikrųjų ir magnetinių polių. Kai kuriose vietose, kur geležinga uolienų aplinka iškraipo pagrindinį magnetinį lauką, atsiranda vietinė trauka, sukurianti nenormalias variacijas (jos yra palyginti trumpose atkarpose). Tuo tarpu visame pasaulyje variacijos skiriasi ir neturi vienodos reikšmės vienoje vietoje. Šie pokyčiai gali būti skirstomi:

– ***Šimtametis kitimas,*** užimantis ilgus periodus dėl reliatyviai kintančios magnetinių ir tikrųjų polių pozicijos;
– ***Metinis kitimas*** – tai mažas sezoninis svyravimas, perkeliamas į šimtametį kitimą;
– ***Paros kitimas*** – tai dieninis kitimas.

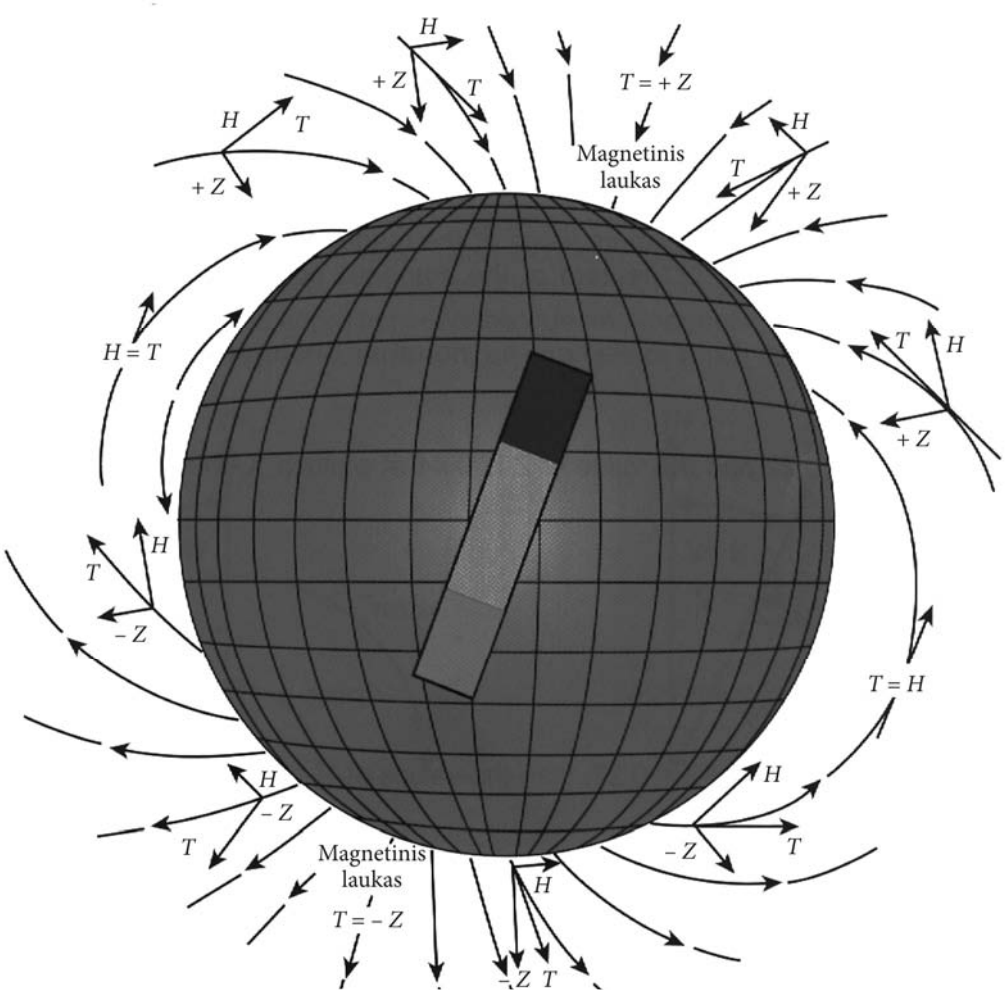


1.4.6 pav. Žemės magnetizmas: linijos AA, BB ir CC – izoklinos



1.4.7 pav. Magnetinių variacijų žemėlapis

Vektoriaus $\vec{H}$, kuris yra vektoriaus $\vec{T}$ projekcija horizontaliojoje plokštumoje, kryptis nustato magnetinio meridiano kryptį. Kampas Δ_M tarp vektorių $\vec{H}$ ir $\vec{T}$ arba tarp magnetinio ir geografinio meridianų krypčių vadinamas ***deklinacijos*** (***nuokrypio***) kampu. Deklinacija laikoma teigiama (1.4.8 pav.), jei vektorius $\vec{H}$ nukreiptas į Rytus nuo magnetinio meridiano, ir neigiama, jei jis nukreiptas į Vakarus.



1.4.8 pav. Geomagnetinio lauko intensyvumo parametrai

Kampas tarp vektorių $\vec{H}$ ir $\vec{T}$ vadinamas ***inklinacijos*** (***nuosvyros***) kampu. Magnetinių polių srityje inklinacijos kampai Θ visada turi didžiausias reikšmes, o magnetinio ekvatoriaus srityje jų reikšmės lygios nuliui. Skirtingiems Žemės rutulio punktams būdingos deklinacijos ir inklinacijos skiriasi ženklu ir dydžiu bei kinta laike. Jų reikšmės ir santykiniai pokyčiai jungiami linijomis, žymimomis specialiuose magnetiniuose žemėlapiuose. Šios linijos vadinamos izoklinomis, jei atitinka pastovųjį inklinacijos kampą (Θ = const), ir izogonomis, jei atitinka deklinacijos kampą (Δ_M = const). Geomagnetinio lauko stiprumo $\vec{T}$ dydis platumos atžvilgiu kinta apytikriai nuo 0,39 Э (erstedo) ekvatoriaus rajone iki 0,75 Э magnetinio poliaus rajone.

Priimtas geomagnetinio lauko modelis skiriasi nuo tikrojo, kadangi Žemės magnetinį lauką formuoja ne tik elektromagnetiniai procesai jo branduolyje, bet ir išoriniai veiksniai. Prie jų priskiriami atmosferiniai procesai bei radiacija. Šie nepastovūs poveikiai sukelia didelius trukdžius, naudojant magnetinį kurso nustatymą.

Magnetinės variacijos ir jų pokyčiai yra pateikiami specialiuose pasauliniuose žemėlapiuose, kurie išleidžiami kas keleri metai. Linijos, jungiančios vienodus variacijos taškus, vadinamos izogoromis, o linijos, jungiančios nulinės variacijos taškus, – agonijos linijos.

Magnetinė nuosvyra. Laisvai pakabinta magnetinė rodyklė pakrypsta nustatyta kryptimi kiekviename Žemės paviršiaus taške. Deja, ji nepriglus lygiagrečiai su Žemės paviršiumi kiekviename taške, nes jėgos linijos nėra horizontalios (1.4.6 pav.). Šios linijos eina vertikaliai iš Šiaurinio magnetinio poliaus ir leidžiasi vertikaliai į Pietinį magnetinį polių. Žinoma, kad ties ekvatoriumi jos praeina horizontaliai Žemės paviršiaus atžvilgiu. Jei magnetinę rodyklę perneštume nuo Šiaurinio iki Pietinio poliaus, tai raudonas galas būtų žemyn pakreiptas starte horizontaliai arti ekvatoriaus ir mėlynas galas pakreiptas žemyn finiše.

Jėgos linijos ir Žemės paviršiaus kampas bet kurioje vietoje yra vadinamas nuosvyros arba polinkio kampu (***inklinacija***), jis kinta nuo 0° (ekvatoriuje) iki 90° (magnetiniuose poliuose). Nuosvyros kampas dažniausiai būna žymus ir teigiamas, kai raudonas laisvai pakabintos magnetinės rodyklės galas nusvyra žemiau horizonto, ir neigiamas, kai mėlynas galas nusvyra žemiau horizonto. Atkreipkime dėmesį, kad visi šiaurinės nuosvyros magnetinio meridiano kampai bus teigiami, o visi pietinės nuokrypos magnetinio ekvatoriaus kampai bus neigiami.

Nuosvyros kampai visose vietovėse analogiškai priklausys nuo geležingos aplinkos poveikio, jų variacijos taip pat pateikiamos specialiuose žemėlapiuose. Linijos, jungiančios vienodus magnetinio nuolinkio taškus, vadinamos ***izoklinomis***, o linija, jungianti nulinius magnetinio nuolinkio taškus, vadinama ***akline*** linija, arba magnetiniu ekvatoriumi.

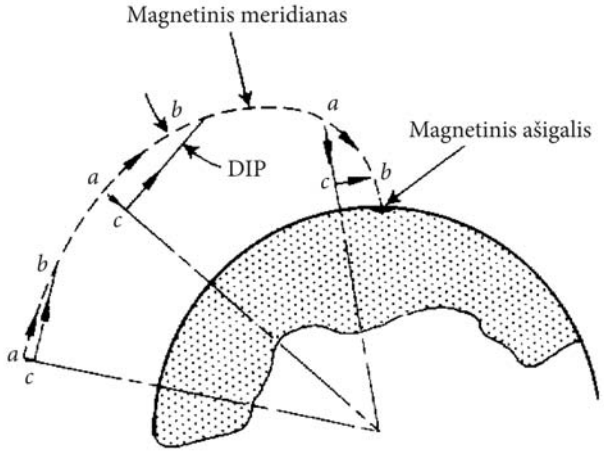
Žemės magnetinis intensyvumas. Kai laisvai pakabinta magnetinė rodyklė Žemės lauke nusistovi ramybės būsenoje, ji tai daro veikiama absoliučios (sumarinės) Žemės magnetinio lauko sukuriamos jėgos.

Absoliutusis Žemės magnetinio lauko jėgos dydis vietovėse yra sunkiai išmatuojamas, bet kartais jį verta žinoti. Todėl priimta nustatinėti šios absoliučiosios jėgos horizontaliąsias ir vertikaliąsias dedamąsias, t. y. vektorių H ir Z modulius (1.4.8 pav.).

Jei nuosvyros kampas θ yra žinomas, tai absoliučioji magnetinio lauko jėga gali būti apskaičiuojama (1.4.9 pav.).

Vertikalioji dedamoji $Z = (a - c)$, horizontalioji dedamoji $H = (c - b)$, sumarinė jėga $T = \sqrt{H^2 + Z^2}$. Tada $\frac{Z}{H} = tg\theta$ ir $Z = Htg\theta$, o $\frac{H}{T} = \cos\theta$ ir $T = H\cos\theta$.

Be to, šių horizontaliųjų ir vertikaliųjų jėgos dedamųjų žinojimas labai svarbus magnetinio kompaso deviacijai nustatyti. Abi dedamosios veikia orlaivio dalių įsimagnetinimą, kurios savo ruožtu daro įtaką kompaso rodmenims priklausomai nuo jo vietos orlaivyje. Ryšys tarp nuosvyros, horizontaliosios ir vertikaliosios jėgų bei jų sumos parodytas 1.4.9 pav.



1.4.9 pav. Ryšys tarp nuosvyros, Z, H ir pilnos jėgos

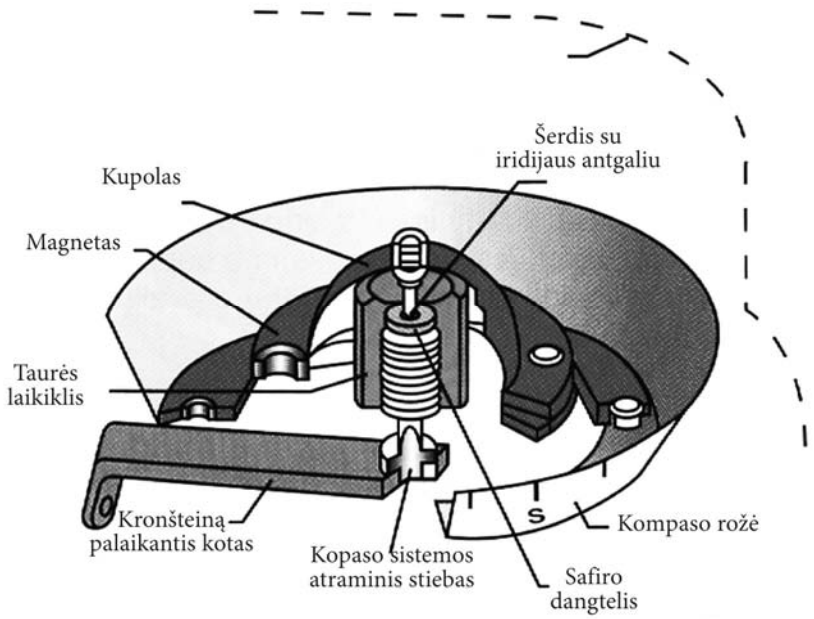
Variacijoms ir nuosvyroms vertinti išleidžiami specialūs žemėlapiai, kuriuose kartu su vidutiniu metiniu pokyčiu pateikiamos H ir Z vertės kiekvienoje Žemės paviršiaus vietoje. Linijos su lygiomis horizontaliomis ir vertikaliomis jėgomis vadinamos izodinaminėmis linijomis.

Žemės magnetinė jėga gali būti vertinama kaip absoliutus arba santykinis dydis. Jei vertiname kaip santykinį dydį, siejamą su orlaivio kompasu, tai normuojama pagal Grinviče esančią horizontaliąją jėgos dedamąją.

1.4.3. Tiesioginio nuskaitymo magnetinis kompasas

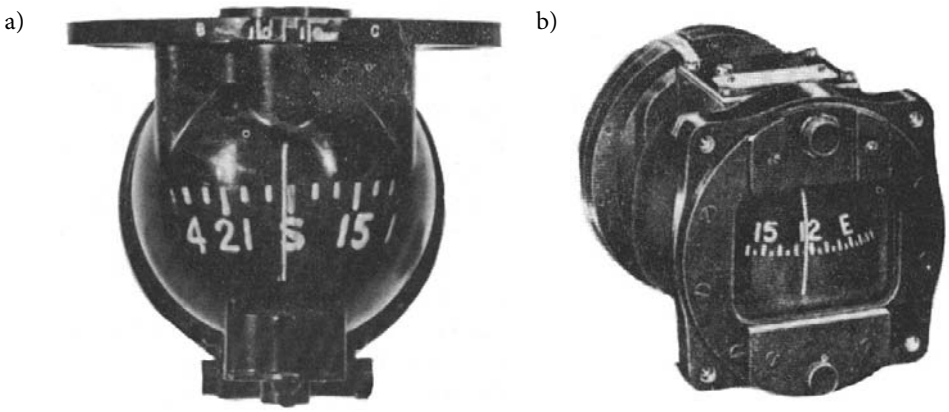
Magnetiniuose kompasuose jautriuoju elementu, nustatančiu magnetinio meridiano kryptį, yra laisvai pakabintas pastovusis magnetas.

Magnetinė sistema. Kompaso rožė (1.4.10 pav.), kuri remiasi į kompaso safyro lizdą, iridžiu padengtu stiebu (adata) ir ant rožės pritvirtinti du cilindriniai pastovūs kobalto-plieno magnetai sudaro judamąją magnetinę kompaso sistemą. Iridis ir safyras naudojami todėl, kad yra atsparūs ilgalaikiam naudojimui ir iki minimumo sumažina ašies trintį. Skalė tvirtinama prie rožės lygiagrečiai su išilgine ašimi, kai kompasas yra orlaivyje. Judamoji sistema yra hermetizuotame korpuse, kuris pripildytas klampaus skaidraus skysčio. Skysčio tankis parenkamas taip, kad jo išstumiama kompaso judamoji sistema sudarytų minimalų slėgį į lizdą. Be to, skystis atlieka kompaso rožės virpesių slopinimą ir sumažina trintį atramoje. Norint kompensuoti skysčio tūrio pakitimus, kintant temperatūrai, naudojami tam tikros konstrukcijos bimetaliniai kompensatoriai. Rodmenys nuskaitomi pagal kompaso rožės sukamąją skalę intervale nuo 0 iki 360° ir ant prietaiso korpuso nustatytą kurso žymę.



1.4.10 pav. Tipinis magnetinės sistemos kompasas

Sukamosios skalės kompasai turi šias pagrindines savybes: magneto sistema yra dubenyje; skystinis slopinimas; skysčio išsiplėtimo kompensacija. Tipiniai sukamosios skalės kompasai parodyti 1.4.11 pav.



1.4.11 pav. Sukamosios skalės kompasai: a – kabinamas; b – tvirtinamas pulte

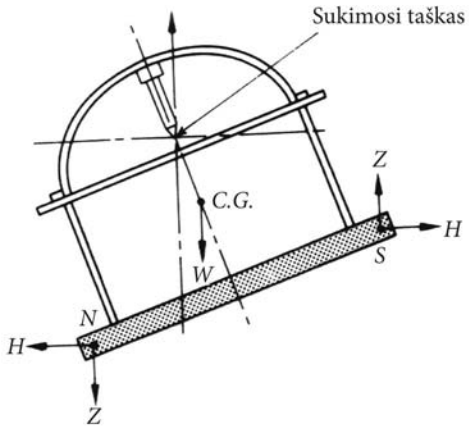
Skystinis slopinimas. Kompaso dubuo užpildomas skysčiu, kad kompasas būtų aperiodiškas, t. y. kad kompaso magnetinė sistema, ją pasukus, sugrįžtų į rimties padėtį be jokių virpesių ar svyravimų. Be to, magnetinės sistemos panardinimas skystyje stabilizuoja magnetinę sistemą, mažina judamosios sistemos ašinį svorį, tuo mažindamas nusidėvėjimą ir trintį. Skysčiai, kurie naudojami magnetiniuose kompasuose, gali būti mineralinės arba alkoholinės kilmės ir turi atitikti šiuos reikalavimus: turėti žemą užšalimo temperatūrą, mažą klampumą ir didelį atsparumą korozijai bei nublukimui.

Skysčio išsiplėtimo kompensacija. Kintant temperatūrai atsirandantys kompasų skysčių tūrio pokyčiai gali sukelti nepageidaujamus efektus. Pavyzdžiui, mažėjant aplinkos temperatūrai, kompaso skysčio tūris mažėja ir magnetinės sistemos dubenyje gali atsirasti oro tarpas, sumažinantis magnetinės sistemos svyravimo slopinimo efektą. Atvirkščiai, didėjant aplinkos temperatūrai, skystis plečiasi, didėja vidinis slėgis, kuris gali sukelti skysčio nutekėjimus per talpos sandarinimus. Todėl svarbu kompaso skysčio dubenyje numatyti tam tikras priemones, kurios kompensuotų temperatūros pokyčių sukeliamus efektus. Tam tikslui dubens dugne įtaisoma gofruota pertvara, kurios padėtį nustato po ją pritvirtintas lankstus bimetalinis strypas. Kai dubuo užpildytas, lankstusis strypas specialiu įrankiu yra nuspaudžiamas, – šis nustatymas daromas norint padidinti dubens tūrį. Jei tokį dubenį įdėsime į žemesnę temperatūrą, tai skystis pradės trauktis, o lankstusis strypas palinks į atitinkamą pusę, deformuos dugno membraną ir taip sumažins dubens tūrį, pašalindamas atsirandančius oro burbulus. Didėjant temperatūrai, skysčio tūris didės, o strypas išsilenks į kitą pusę, padidindamas bendrąjį dubens tūrį ir taip įvyks kompensacija.

Magnetinis kompasas su tiesioginiu nuskaitymu taikomas kaip dubliuojantis prietaisas ir naudojamas, kai pagrindiniai sugenda. Pastatytas orlaivio kabinoje toks kompasas turi nedidelį tikslumą, kadangi jį veikia magnetiniai laukai, atsirandantys dėl arti esančių feromagnetinių masių ir elektrinės įrangos. Kenksmingam poveikiui mažinti dažnai naudojami nuotoliniai kompasai. Jų jautrieji elementai tvirtinami tokiose orlaivio vietose, kur Žemės magnetinio lauko $\vec{H}$ horizontaliosios komponentės pokyčiai yra minimalūs.

Magnetinės nuosvyros poveikis kompaso magnetinei sistemai. Nuosvyra yra kampas tarp pakabintos magnetinės rodyklės ir horizonto kiekvienoje vietoje, veikiamoje Žemės magnetinio lauko vertikaliosios komponentės *Z*. Norint tiksliai nustatyti magnetinės krypties padėtį, reikia žinoti magnetinio lauko horizontaliosios komponentės *H* poveikį. Tačiau pasirodo, kad maksimalus tikslumas bus pasiekiamas tokiose vietose, kur nuosvyra yra lygi nuliui arba artėja prie nulio. Kadangi tokios vietovės yra ekvatoriuje ar šalia jo, tai magnetine sistema pagrįstas kompasas galėtų tiksliai veikti labai ribotose Žemės vietovėse.

Kompasas turi būti sukurtas taip, kad neutralizuotų vertikaliosios *Z* komponentės poveikį, taip išlaikydamas magnetinę sistemą horizontalioje padėtyje ir leisdamas jai tiksliai veikti daug didesnėse platumose. Yra keletas būdų, kaip išspręsti šią problemą, bet metodas, kuris visada pasiteisina ir yra bene efektyviausias – padaryti magnetinę sistemą laisvai svyrančią vertikaliojoje plokštumoje. Tokio kompaso svirimo ašis turi būti svorio centre, kaip parodyta 1.4.12 pav.



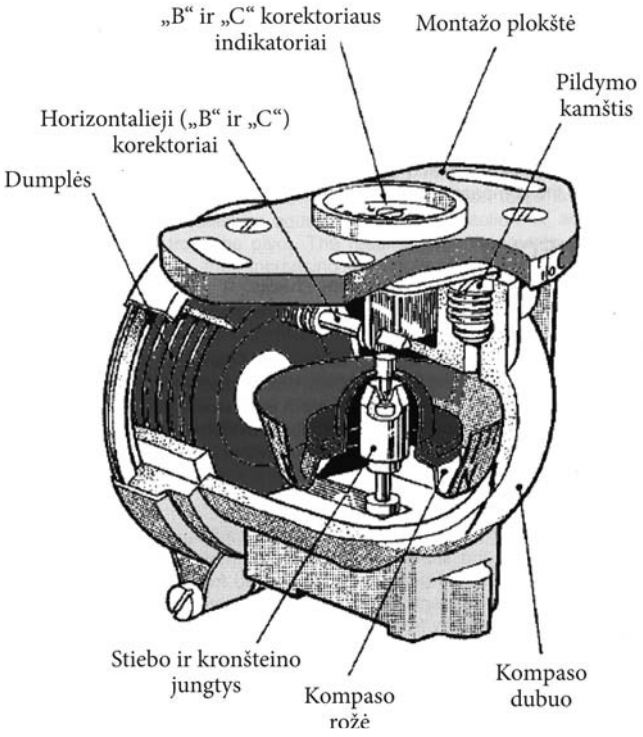
1.4.12 pav. Magnetinės nuosvyros kompensavimas

Kai lauko vertikalioji komponentė *Z* veikia magnetinę sistemą, ji yra priverčiama pasvirti, nuo sistemos svorio centro padėties žemyn aplik svyravimo ašies tašką. Jėga dabar veikia aukštyn per ašį, o kita jėga veikia žemyn per svorio centrą ir, kai abi jėgos veikia ne ta pačia linija, atsiranda jėgų poros atstojamoji. Veikianti jėgų poros atstojamoji stengiasi atstatyti magnetinę sistemą į horizontalią padėtį. Tačiau tokiu būdu visiškai kompensuoti Žemės lauko vertikaliosios komponentės *Z* įtakos kompaso magnetinei sistemai nepavyksta, išskyrus magnetinio ekvatoriaus zonoje, kur *Z* vertė yra nulis.

Kompasai su magnetinės sistemos vertikaliuoju svirimu leidžia pasiekti mažiausią magnetinės sistemos nuokrypį tikrojo horizonto atžvilgiu tarp 60° Šiaurės ir 40° Pietų platumų, apytiksliai 2° (su sąlyga, kad vertikalioji komponentė *Z* ir Žemės traukos jėga yra tik tos dvi kompasą veikiančios jėgos).

1.4.4. Kompaso konstrukcija, pagreičių ir posūkių paklaidos

Sukamosios skalės kompaso konstrukcija yra pateikta 1.4.13 pav. Magnetinė sistema sudaryta iš žiedų (dumplių) pavidalo kobalto-plieno magnetų ir lengvojo lydinio skalės, pritvirtintos taip, kad būtų arčiau kompaso dubens vidinio paviršiaus, kad taip sumažintų stebėjimo paralakso paklaidas. Skalė sugraduota kas 10° laipsnių, tarpiniai rodmenys vertinami interpoliuojant. Rodmenų nuskaitymas atliekamas pagal ant vidinio dubens paviršiaus nubrėžtą liniją.



1.4.13 pav. Magnetinio sukamosios skalės kompaso tipinė konstrukcija

Sistemos pakaba yra sudaryta iš įprastos iridžio-antgalio ašies ir safyro taurės, palaikomos stiebo ir kronšteino junginiu (1.4.13 pav.). Kompaso magnetinė sistema montuojama taip, kad tarpas tarp viršutinės stiebo dalies ir dubes viršaus būtų mažesnis nei nuotolis tarp safyro taurės ir jos laikiklio viršaus. Safyro taurė turi nuolaidžias ir nupoliruotas sieneles. Magneto sistemos balansas yra toks, kad į Šiaurę pasisukęs galas yra 2° pasviręs žemyn, kad iš dalies kompensuotų magnetinės nuosvyros kampą.

Kompaso dubuo yra išlietas iš nemagnetinės medžiagos ir iš išorės nudažytas juodu matiniu laku, išskyrus mažą plotelį, kuriame fiksuojami skalės rodmenys. Ši dubens dalis yra išlieta taip, kad sudarytų skalės padalų didinimo efektą. Magnetinės sistemos slopinamuoju skysčiu naudojamas silikono polimeras. Slopinamojo skysčio tūrio pokyčiai, atsirandantys dėl temperatūros kitimo, pašalinami dubens dugne įtaisomu kompensatoriumi.

Nuokrypių efektai dėl išilginių ir šoninių orlaivio magnetizmo komponenčių (1.4.5 poskyrį) kompensuojami pastoviojo magneto korektoriais, įtaisytais ant kompaso montavimo plokštės. Kai kuriose orlaivių

kompasų versijose vertikaliosios magnetinės komponentės įtakai kompensuoti gali būti montuojamas papildomas korektorius.

Sukamosios **s**kalės kompasas, pavaizduotas 1.4.11 pav., b, pritaikytas tiesiogiai pritvirtinti prietaisų lentoje. Magnetinė sistema artima anksčiau aptartai sistemai. Žalvarinis dubens formos korpusas hermetizuotas. Jame esančio slopinamojo skysčio tūrio pokyčiai kompensuojami diafragmos tipo deformaciniu įrenginiu, įterptu tarp skysčio ir dubens dugno. Pastoviojo magneto kompaso deviacijų kompensatorius įtaisytas dubens viršuje taip, kad korekcijos ašys gali būti pasiekiamos iš kompaso priekio. Maža lemputė yra įtaisyta tam, kad apšviestų skalę.

Pagreičių ir posūkių paklaidos. Taikant magnetinio kompaso konstrukcijoje priemones, skirtas sumažinti išorinių poveikių įtakai rodmenų tikslumui sumažinti, dažnai vėliau nustatoma, kad metodai, eliminuojantys nepageidaujamas paklaidas, esant tam tikroms sąlygoms, patys gali būti potencialūs paklaidų šaltiniai. Pavyzdžiui, svyranti kompaso magnetinė sistema sukurta tam, kad veiktų prieš magnetinės nuosvyros efektus. Taigi kompasas gali būti naudojamas ilgesniems platumos nuotoliams ir nesukelti jokios pastebimos klaidos, tuo metu, kai kiekvienas orlaivio manevras, sukeliantis orlaivio pagreitį rytine ar vakarine magnetinio meridiano atžvilgiu kryptimi, sukelia sukimo momentą magnetinės sistemos atžvilgiu, priversdamas ją klaidingai pasisukti.

Yra dvi pagrindinės paklaidų rūšys, atsirandančios dėl tokių pagreičio komponenčių įtakos. Jos vadinamos ***pagreičio*** ir ***šiaurinių posūkių paklaidomis***. Prieš pradedant išsamiau nagrinėti šias paklaidas, naudinga apsvarstyti efektą, kuris veikia orlaivyje pakabintą paprasčiausią švytuoklę.

Kai orlaivio kursas ir greitis pastovus, švytuoklės svorio centras, esantis žemiau pakabinimo taško, išlieka vertikaliosios rimties būsenos. Tačiau, jei orlaivis sukasi, greitėja arba lėtėja, švytuoklė nukrypsta nuo vertikaliosios padėties. Veikiamas inercinės jėgos švytuoklės svorio centras sąlyginai vėluoja orlaivio posūkio centro atžvilgiu ir nukrypsta nuo normaliosios padėties. Esant teisingo orlaivio posvyrio posūkiui, jėgos, veikiančios svorio centrą, privers švytuoklę išlikti vertikalia orlaivio horizontaliajai plokštumai ir nukrypti į viršų kampu, lygiu orlaivio posvyrio kampui. Tokiu būdu orlaivio posūkiai, lydimi pagreičių jų centrų atžvilgiu, nepriklausomai nuo to, ar jie atliekami su reikamu posvyriu ar ne, privers švytuoklę nukrypti nuo vertikaliosios padėties ir tuo patvirtins, kad bet koks orlaivio greitėjimas ar lėtėjimas sukels švytuoklės padėties nuokrypas.

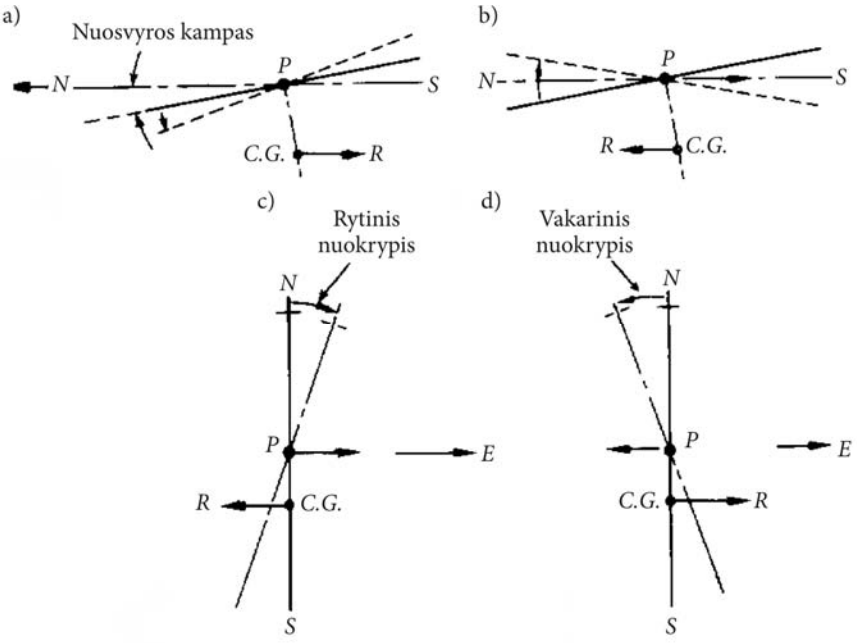
Kompaso magnetinė sistema, pakabinta kaip švytuoklė, kad priešintųsi Žemės magnetinio lauko sukeliamiems nuosvyros efektams, elgsis kaip švytuoklė, t. y. kiekvienas orlaivio skrydžio pagreitėjimas ar palėtėjimas sukels jos svorio centro poslinkį nuo normaliosios padėties.

Pagreičio paklaidos gali būti plačiau apibūdintos, kaip Žemės lauko vertikaliosios komponentės efektas, sukeliantis kompaso pakabintos magnetinės sistemos krypties paklaidas, pasireiškiančias šios sistemos gravitacinio centro padėties kitimu jo normalios padėties atžvilgiu. Šio efekto sukeliamos kurso nustatymo kompasu paklaidos priklausys nuo orlaivio skrydžio krypties.

Pirmiausia panagrinėsime paklaidų galimybes, orlaiviui skrendant į šiaurinį pusrutulį ir greitėjant Šiaurės link. Orlaivio greitėjimo sukeliamos jėgos parodytos 1.4.14 pav., a. Greitėjimo pradžioje kompaso magnetinės sistemos kabinimo taškas *P* ir svorio centro taškas *C.G.* yra magnetinio meridiano plokštumoje. Atsirandanti pagreičio jėga *R*, veikianti magnetinės sistemos svorio centrą, sukelia magnetinės sistemos priekinės (šiaurinės *N*) dalies nuolydį, taigi padidina nuolinkio kampą be jokio krypties pokyčio. Atvirkščiai, kai orlaivis lėtėja, jėga *R* svorio centre sukelia sistemos galinės (pietinės *S*) dalies nuolydį, irgi be krypties pakitimo, kaip parodyta 1.4.14 pav., b.

Kompaso magnetinės sistemos krypties pokyčių ir kurso nustatymo paklaidų atsiranda, kai orlaivis skrenda ne į šiaurinį ir ne į pietinį pusrutulį ir keičia greitį ne *N-S* meridiano kryptimi.

Įvertinkime kompaso magnetinės sistemos efektus, kai orlaivis skrenda šiauriniame pusrutulyje, ir greitėja, esant rytiniam kursui (1.4.14 pav., c). Pagreičio jėga vėl veiks kabinimo tašką *P*, o reakcija *R* – svorio centrą, bet šiuo atveju jos veiks viena nuo kitos tam tikrais kampais magnetinio meridiano plokštumos atžvilgiu. Atsiradusi jėgų pora stengsis pasukti kompaso magnetinę sistemą pagal laikrodžio rodyklę sukeldama tariamąjį posūkį į šiaurę, arba vadinamąją rytinę deviaciją. Kai orlaivis lėtės (1.4.14 pav. d), atsiras atvirkštinis efektas, jėgų pora stengsis pasukti magnetinę sistemą prieš laikrodžio rodyklę, taip sukeldama tariamąjį posūkį į pietus arba vakarinę deviaciją.



1.4.14 pav. Pagreičio paklaidos: a – greitėjimas šiaurine kryptimi į šiaurinį pusrutulį; b – lėtėjimas šiaurine kryptimi į šiaurinį pusrutulį; c – greitėjimas rytine kryptimi į šiaurinį pusrutulį; d – lėtėjimas rytine kryptimi į šiaurinį pusrutulį

Vadinasi, šiauriniame pusrutulyje orlaivio greitėjimas sukelia rytinę deviaciją rytiniams kursams ir vakarinę deviacija vakariniams kursams, tuo tarpu, kai lėtėjimas sukelia atvirkštinį efektą. Pietiniame pusrutulyje visiems nagrinėtiesiems atvejams rezultatas bus atvirkščias.

Kai artėjama prie pietinių ar šiaurinių kursų, tariamosios deviacijos dydis mažėja, pagreičio paklaida kinta pagal sinuso funkcija nuo kompaso kurso kampo.

Kita priežastis, sukelianti magnetinės sistemos nepageidaujamus posvyrius ir kurso nustatymo nuokrypas, yra orlaivio padėties kitimas horizontaliojo skrydžio atžvilgiu. Pavyzdžiui, jei orlaivis skrydžio metu aukštėja, esant tam pačiam greičiui, tai kompaso magnetinės sistemos reakcija atitinka orlaivio lėtėjimą, nes tuo metu horizontalusis orlaivio greitis kinta. Taigi, jei orlaivio padėties pokytis sukelia jo greičio pokyčius, kompaso kurso deviacija gali būti pastebima.

Posūkių paklaidų atsiranda, kai orlaivis atlieka posūkį, o magnetinės sistemos pakabos taškas juda pagal posūkio kelio kreivę tuo metu, kai sistemos svorio centras, veikiamas posūkio sukurtos pagreičio išcentrinės jėgos, gali sukelti sistemos išorinius posvyrius ir sūkius taip, kad tariamosios deviacijos ar posūkio paklaidos tampa reikšmingos. Taigi, esant orlaivio posūkiui, kompaso magnetinė sistema turi tendenciją išlaikyti padėtį, lygiagrečią su skersine orlaivio plokštuma, kartu sukeldama tariamąjį šalutinį kampo nuokrypį, veikiamą orlaivio posvyrio kampo. Esant teisingo posvyrio posūkiui, magnetinės kompaso sistemos nuokrypio kampas bus lygus orlaivio posvyrio kampui, nes išcentrinės ir gravitacinės jėgų kryptys sutampa ir išsidėsto normaliai orlaivio posvyrio plokštumai bei praeina per magnetinės sistemos kabinimo tašką ir svorio centrą. Šiuo atveju išcentrinė jėga neturi jokios įtakos, išskyrus svorio centro įtempimą, sumažinantį natūralų magnetinės sistemos nuolinkio kampą. Tačiau, kai tik magnetinė sistema yra pakreipta nepriklausomai nuo tinkamo orlaivio posvyrio, ji laisvai juda dėl Žemės komponentės *Z* poveikio, kuri turi šoninę plokštumos komponentę, sukeliančią jos neigiamus poslinkius ir kurso nustatymo paklaidas.

Posūkių paklaidų pobūdis ir dydis priklauso nuo orlaivio kurso, magnetinės sistemos pokrypio ir posvyrio kampų. Panagrinėsime keletą pavyzdžių, kai orlaivio skrydžio kryptis yra keičiama magnetinio meridiano atžvilgiu šiauriniame ir pietiniame Žemės pusrutuliuose.

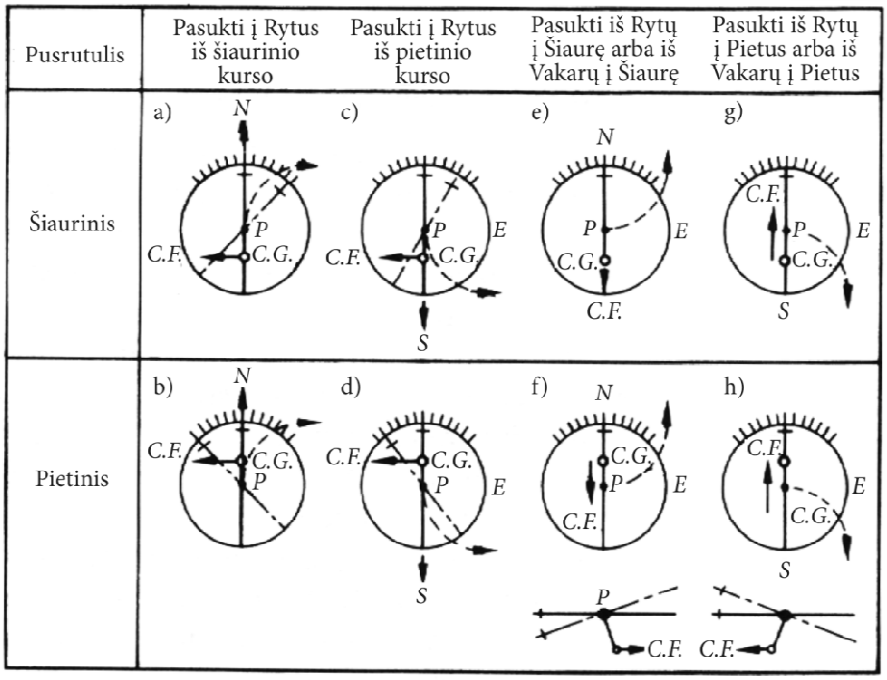
Posūkis iš šiaurinės krypties į Rytus ar Vakarus. 1.4.15 pav., a rodo orlaivyje esančią kompaso magnetinę sistemą, skrendant šiauriniame pusrutulyje šiaurine kryptimi. Į Šiaurę nukreipta kompaso magnetinės sistemos dalis sutampa su šiaurinio magnetinio poliaus kryptimi.

Jei pilotas keičia orlaivio skrydžio kryptį Rytų link, tai posūkio metu atsiranda išcentrinė jėga, veikianti kompaso magnetinės sistemos svorio centrą. Ši jėga verčia magnetinę sistemą suktis ta pačia kryptimi kaip ir posūkis, o kai sistema pasvyra kartu su orlaiviu, Žemės magnetinio lauko jėgos vertikalioji

komponentė *Z* veikia magnetinės sistemos šiaurinę *N* dalį, sukeldama papildomą sistemos posūkį. Dabar, magnetinės sistemos posūkis priklauso nuo orlaivio sukimosi ir posvyrio spartos, sukeliančios išcentrines jėgas, todėl galimi trys kompaso rodmenų variantai:

– Paklaidos nuokrypis sutampa su tikruoju, kai kompaso magnetinė sistema sukasi lėčiau nei orlaivis;
– Nėra jokio nuokrypio, kai kompaso magnetinė sistema ir orlaivis sukasi vienodu greičiu;
– Paklaidos nuokrypis priešingas tikrajam, kai kompaso magnetinė sistema sukasi greičiau nei orlaivis.

Tie patys efektai atsiras, jeigu kursas keičiasi iš Šiaurės į Pietus, kai skrendama šiauriniame pusrutulyje. Pietiniame pusrutulyje (1.4.15 pav., b) efektai yra šiek tiek kitokie. Dabar pietinis magnetinis polius yra vyraujantis, taigi natūralus kompaso magnetinės sistemos nuolinkio kampas keičiasi, pernešant svorio centrą į Šiaurę nuo kabinimo taško. Vėl galime apsvarstyti atvejį, kai orlaivis sukasi nuo šiaurinio link rytinio kurso. Tuomet, kai kompaso magnetinės sistemos svorio centras yra šiauriau kabinimo taško, išcentrinis ją veikiantis greitėjimas priverčia magnetinę sistemą suktis greičiau ir į priešinga pusę. Nors posūkis yra teisingas, bet rodomas didesnis nei jis yra iš tikrųjų.



1.4.15 pav. Sukimosi paklaidos

Posūkis iš pietinės krypties į Rytus ar Vakarus. Jei posūkis šiauriniame pusrutulyje (1.4.14 pav., c), tada dėl magnetinės sistemos svorio centro pietinio nuokrypio pakabos taško atžvilgiu atsiranda kompaso sistemos posūkio paklaida ir rodmenys yra analogiški, kai sukamasi iš šiaurinio kurso šiauriniame pusrutulyje.

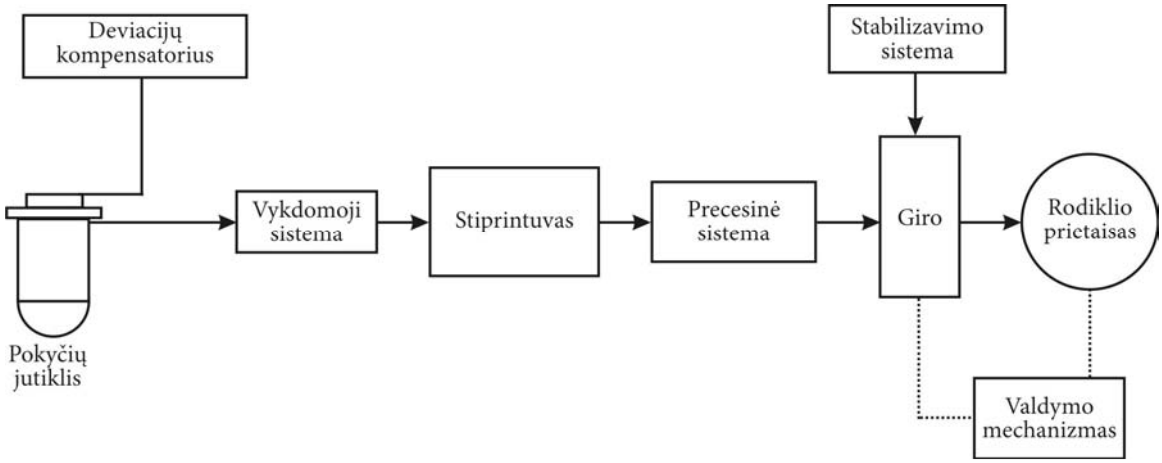
Sukantis iš pietinės krypties pietiniame pusrutulyje (1.4.15 pav., d), magnetinės sistemos svorio centras yra šiauriau nuo kabinimo taško ir sukelia tas pačias pasekmes, kaip ir sukantis iš šiaurinės krypties pietiniame pusrutulyje. Abiem atvejais didžiausias poveikis kompaso rodmenims bus, kai posūkiai atliekami arti šiaurinių ar pietinių krypčių, o labiausiai pasireikš, kai sukamasi per Šiaurę. Todėl, apibūdinant tokio tipo išcentrinio pagreičio efektus kompaso magnetinėms sistemoms, dažnai naudojamas terminas ***šiaurinė sukimosi paklaida.***

Posūkis iš Rytų ar Vakarų. Kai sukamasi iš Rytų ar Vakarų krypties nepriklausomai šiauriniame ar pietiniame pusrutuliuose (1.4.15 pav., e–h), nebus jokios kompaso rodmenų paklaidos, nes išcentrinis pagreitis veikia vertikaliojoje plokštumoje, einančioje per magnetinės sistemos kabinimo tašką ir svorio centrą.

Svorio centro nuokrypos nuo normalios padėties į Šiaurę *N* ar į Pietus *S* didina arba mažina magnetinės sistemos svyravimo pasipriešinimą nuolinkiui. Tai susiję su posūkiais į Rytus ar Vakarus, kai magnetinės sistemos šiaurinis *N* ar pietinis *S* kraštas pakeltas į viršų, kompaso magnetinės sistemos padėtis yra arčiau krypties, kuriai nuokrypos jėga lygi nuliu, esant leistiniesiems nuolinkio padėtiems kampams. Jeigu kompasas neteisingai sureguliuotas pasvirimams, tai kiekviena neteisinga nuokrypos jėga taps vyraujanti ir sukels tariamųjų posūkių rodmenis.

1.4.5. Nuotolinio nuskaitymo kompasai

Šie kompasai dažniausiai naudojami ir jų sudėtyje yra magnetinis jautrusis elementas, valdantis giroskopinį rodmenų elementą. Šis virtualusis derinys, kurį sudaro magnetinis kompasas ir kryptinis giroskopas, yra logiškas žingsnis, tobulinant orlaivio kurso nustatymo prietaisus. Tačiau patobulintose orlaivių kurso nustatymo sistemose vis tiek neišvengiama magnetinio kompaso ir kryptinio giroskopo paklaidų, be to, kyla techninių sunkumų sujungiant šiuos prietaisus. Norint sumažinti paklaidų šaltinių įtaką ir siekiant geresnio prietaisų tikslumo, diegiami nauji sujungimo įtaisai. Vienas iš jų – magnetinis-indukcinis keitiklis, keičiantis magnetinio lauko stiprumą į kintamosios srovės įtampą sinchronine perdavimo sistema. Būdai, kuriais šios naujos technologijos yra įdiegiamos į vartojamas sistemas, priklauso nuo konkretaus gamintojo, dėl tos pačios priežasties dauguma komponentų sistemose gali skirtis. Tačiau esminiai valdymo principai ir 1.4.16 pav. pateikti pagrindiniai komponentai išlieka tie patys.

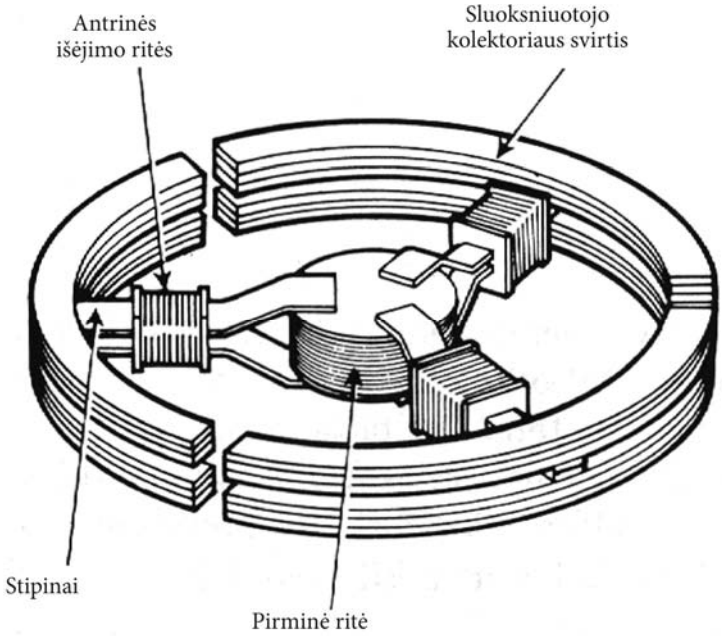


1.4.16 pav. Būtini nuotolinio nuskaitymo kompaso sistemų elementai

Pokyčių jutiklis. Tai įtaisas, jautrus Žemės magnetinio lauko srauto pokyčiams, keičiantis juos į elektromagnetinės indukcijos sukeliamą kintamosios srovės įtampą ir pagal gaunamos įtampos dydį valdantis magnetino lauko krypties rodiklį. Kitais žodžiais tariant, magnetinio srauto stiprumo pokyčių jutiklis elgiasi ir kaip indukcinis orlaivio kurso valdymo kintamosios srovės sinchroninis daviklis – tai dar viena jo funkcija. Principinė magneto-indukcinio daviklio schema pateikta 1.4.17 pav.

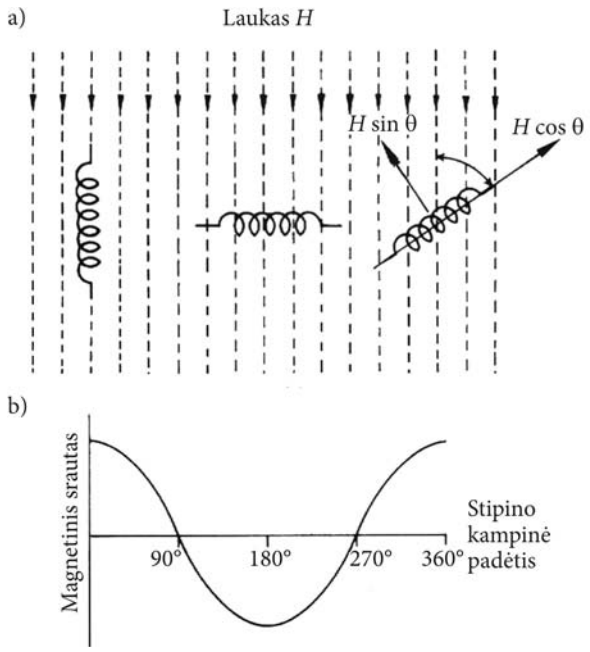
Jis turi trijų stipinų metalinio rato pavidalą, kurio apvadas perpjautas tarp stipinų į segmentus, veikiančius kaip atskiri srauto pokyčių nustatymo elementai.

Rato centre yra ritė, atliekanti pirminių transformatoriaus vijų funkciją, tuo tarpu stipinuose esančios ritės atlieka antrinių vijų funkcijas. Kodėl indukciniame krypties daviklyje panaudotos trys antrinės vijos, išdėstytos ant stipinų, bus paaiškinta šiame skyriuje.



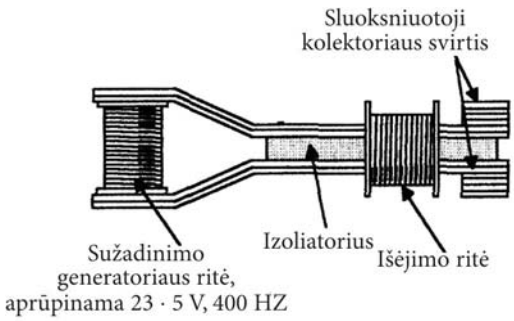
1.4.17 pav. Pagrindinė magnetoindukcinio srauto krypties daviklio konstrukcija

Tarkime, kad turime indukcine ritę, kuri daro posūkius vienoje tolydinio magnetinio lauko plokštumoje. Praeinantis per ritę magnetinis srautas bus didžiausias tada, kai jos simetrijos ašis sutaps su magnetinio lauko kryptimi, ir bus lygus nuliui, kai yra tam tikru kampu į magnetinio lauko linijas, o kai kampas yra 180° magnetinis srautas bus didžiausias, tik priešingo ženklo. 1.4.18 pav., a pavaizduota ritė, įdėta į magnetinį lauką, kurio stiprumas yra H. Bendruoju atveju praeinantis per ritę magnetinio lauko srautas gali būti išskaidytas į dvi dedamąsias: vieną, sutampančią su ritės ašimi ir lygią $H{\cdot}\cos\theta$, ir kitą, statmeną ritės ašiai ir lygią $H{\cdot}\sin\theta$. Pastaroji dedamoji nesukelia jokio efektyvaus srauto per ritę, taigi visas praeinantis pro ritę magnetinis srautas yra proporcingas kosinuso kampui tarp ritės ašies ir magnetinio lauko linijų. Visa tai pavaizduota 1.4.18 pav., b grafike.



1.4.18 pav. Maža ritė, esanti magnetiniame lauke:
a – dedamosios; b – visas srauto pokytis

Jei ritė būtų įtaisyta orlaivyje taip, kad horizontaliojoje plokštumoje jos ašis būtų išilgai orlaivio ašiai, tada ji būtų veikiama Žemės magnetinio lauko horizontaliosios komponentės *H*, o ir praeinantis per ritę magnetinis srautas būtų proporcingas magnetiniam orlaivio kursui. Tampa aišku, kad toks indukcinės ritės išdėstymas orlaivyje yra kompaso sistemos, kuri gali aptikti Žemės magnetinį lauką be nuolatinio magneto pagalbos, pagrindas. Deja, toks paprastas būdas negali būti praktiškai pritaikomas, nes, norint nustatyti magnetinį kursą, reikia išmatuoti magnetinio srauto dydį, o tam nėra jokio paprasto ir tiesioginio būdo tą padaryti. Vis dėlto, jei srautas yra sukeltas, kai keičiasi ritės ir Žemės dedamųjų tarpusavio kampinė padėtis, galime išmatuoti įtampą, sukeltą besikeičiančių laukų ir susieti įtampos pokyčius su magnetinio srauto krypties pokyčiais. Šis metodas panaudotas 1.4.19 pav. pavaizduotoje konstrukcijoje.



1.4.19 pav. Indukcinio daviklio stipino sekcija

Kiekvienas stipinas susideda iš apatinės ir viršutinės atramos, kurios deramai izoliuotos viena nuo kitos ir padarytos tokios formos, kad gaubtų centrinę šerdį, kurį yra pirminėje (sužadinimo) ritėje. Stipinų alkūnės gaminamos iš specialiai parinkto lydinio permalojaus, turinčio savybę greitai įsimagnetinti, tačiau prarandančio beveik visas savo magnetines savybes, kai išorinis įmagnetinimo šaltinis pašalinamas.

Pagal savo išsidėstymą daviklio stipino sekcijoje skiriami du magnetoindukcinio srauto tipai:

1) kintantysis magnetinis srautas alkūnėse, sužadintas pirminėje ritėje tekančios kintamosios srovės (šis srautas yra tokio paties dažnio, kaip ir sužadinimo srovė, o jo stiprumas yra proporcingas srovės amplitudei);
2) statinis magnetinis srautas alkūnėse, sukeltas Žemės komponentės *H*, kurio maksimali reikšmė priklauso nuo *H* stiprumo ir kosinuso kampo tarp *H* krypties ir stipino ašies.

Jei tarp daviklio stipino ašies ir magnetinio lauko horizontalios dedamosios *H* linijų krypties yra statusis kampas, tai statinis magnetinis srautas bus lygus nuliui. Taigi, esant kintamajai įtampai pirminėje ritėje, sumarinis srautas išėjimo ritėje bus lygus priešingų fazių kintamojo srauto viršutinėje ir apatinėje alkūnėje sumai, t. y. jis bus lygus nuliui, kaip parodyta 1.4.20 pav.

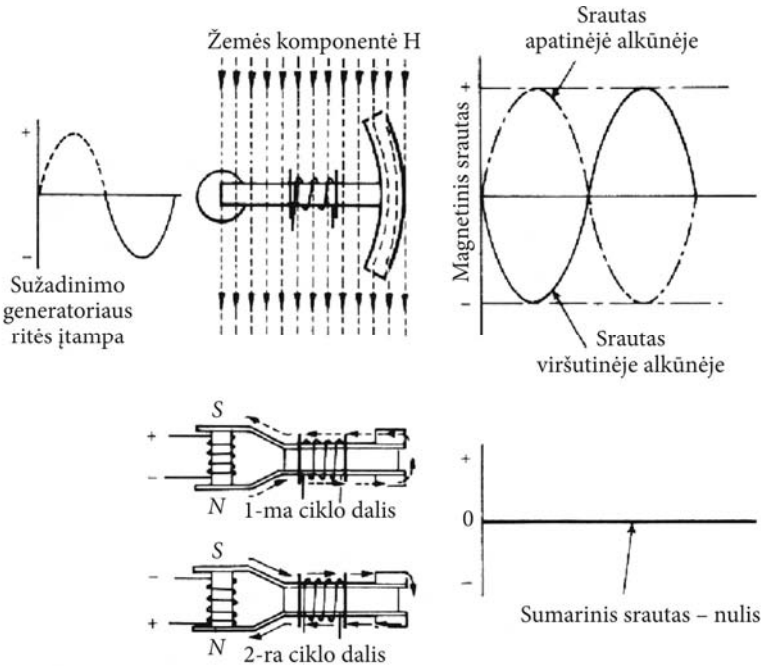
Srauto perdavimas iš pirminės ritės į alkūnes priklauso nuo magnetinių medžiagos savybių (1.4.21 pav.).

Kreivė, vaizduojanti priklausomybę, kai medžiaga yra permalojus, palyginta su geležimi. Taip vaizdžiai parodoma, kaip lengvai jos įsimagnetina. Grafikuose yra keli būdingieji taškai, kuriuos reikia aptarti:

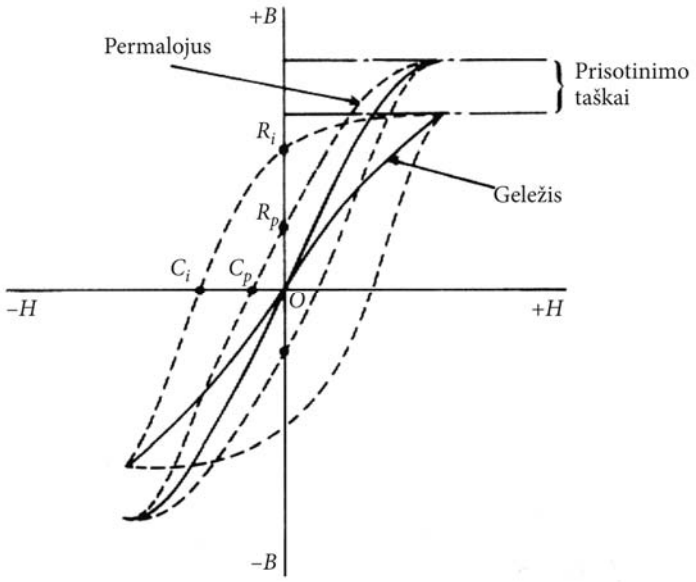
Magnetinė skvarba – tai medžiagos savybė, apibūdinama santykiu tarp magnetinio srauto tankio *B* ir magnetinio srauto stiprumo *H*; Hizterezės kilpos statumas rodo, kad permalojus turi didesnę magnetinę skvarbą.

Prisotinimo taškas – tai magnetinio srauto stiprumo reikšmė, kurią pasiekęs įmagnetinimo procesas baigiasi, kai medžiaga yra visiškai įsimagnetinusi; Permalojus imlesnis magnetinei indukcijai nei geležis, tai rodo aukštesnis prisotinimo taškas.

Histerezės kreivės ir ciklas – jos atvaizduoja po įmagnetinimo liekamąjį nesutapimą, kai pasiekusi prisotinimą magnetinė jėga mažinama iki nulio iš abiejų – teigiamos bei neigiamos pusių ir apibūdina medžiagos savybę išlaikyti įmagnetinimą, vadinamą magnetine hiztereze. Geležies liekamasis įmagnetinimas didesnis (atstumas OR_i) nei permalojaus. Reikia, kad indukcinis daviklis turėtų mažiausią liekamąjį įmagnetinimą, kurį galį turėti medžiagos, ir, kaip matyti iš atstumo R_p, permalojus tam puikiai tinka.



1.4.20 pav. Sumarinis srautas, kada daviklio stipinas yra statmenas Žemės H dedamajai

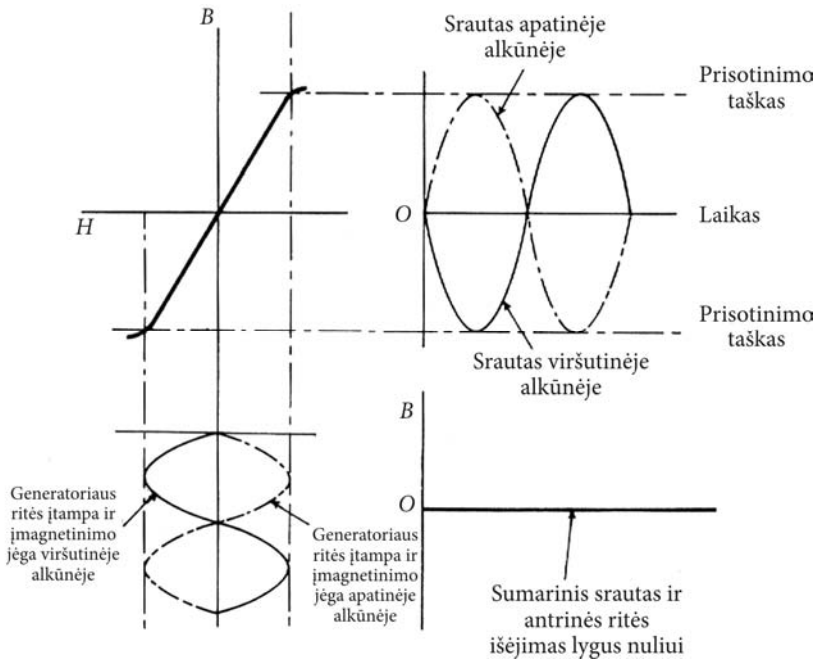


1.4.21 pav. *B/H* kreivės ir hizterezės kilpos

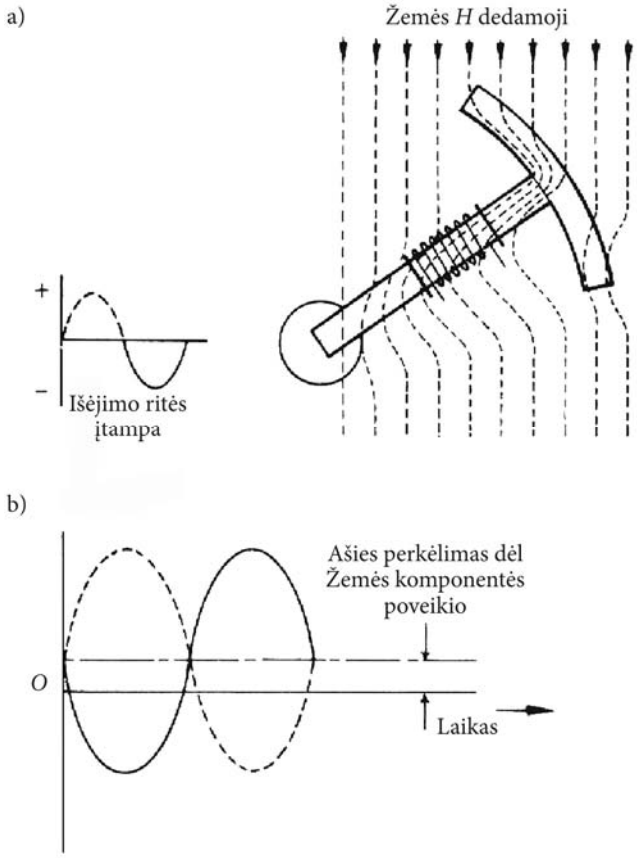
Koercetyvumas – tai medžiagos savybė, pagrįsta neigiamos įmagnetinimo jėgos (koercetyvinė jėga) dydžiais, reikalingais visiškai medžiagas išmagnetinti, grafike tai yra atstumai OC_i ir OC_p. Koercetyvumas lemia reikiamą magnetinę energiją medžiagų įmagnetinimui palaikyti.

Detektoriaus alkūnėje sukelto magnetinio srauto kitimo pobūdis pateiktas grafikuose 1.4.22 pav. Čia parodyta pirminio kintamojo lauko bangų forma, pateikta srauto tankio ašies *B* atžvilgiu, *B/H* kreivė ir srautai alkūnėse, iš kurių išvesta projekcija į *H* ašį. Suminis srauto tankis alkūnėse yra atskirų kreivių suma. Kadangi suminis srauto tankis nekinta, tai išėjimo įtampa antrinėje ritėje turi taip pat būti nulis.

Aptarsime prisotinimo poveikius, kai srauto detektorius, pasuktas bet kokiu kitu kampu, išskyrus statųjį, horizontaliosios Žemės magnetinio lauko dedamosios *H* atžvilgiu, kaip parodyta 1.4.23 pav.



1.4.22 pav. Magnetinio srauto kitimo pobūdis keitiklio sekcijoje



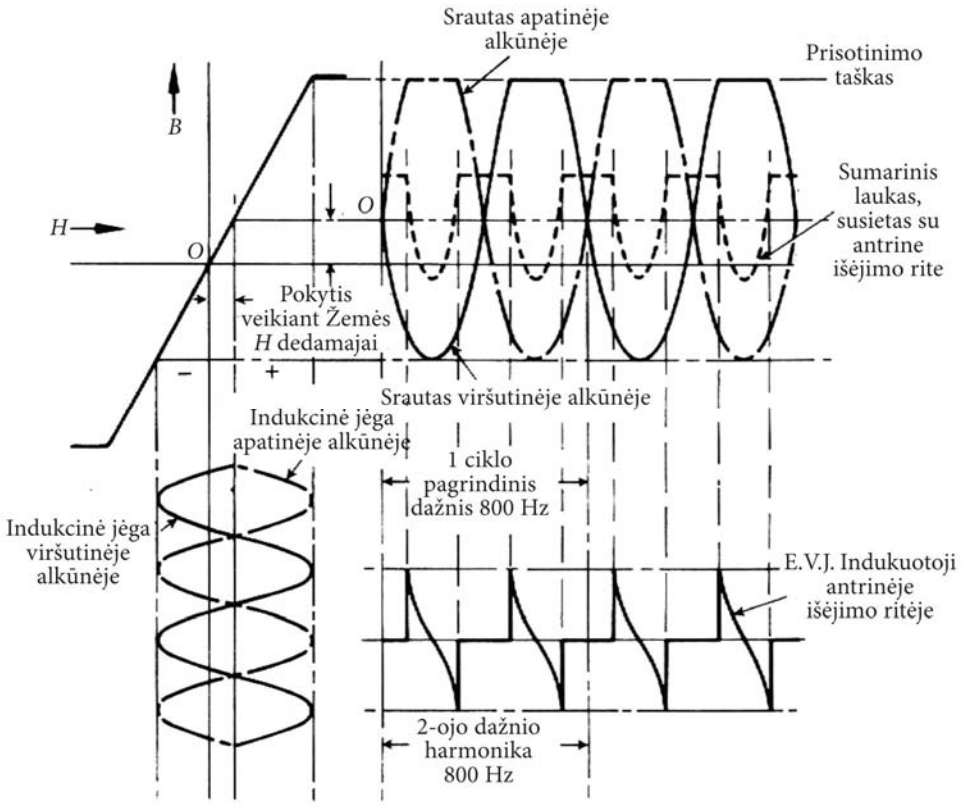
1.4.23 pav. Žemės magnetinio lauko H dedamosios įtaka: a – *H* krypties detektorius; b – ašies perkėlimas, veikiant statiniam srautui

Šiuo atveju pirmine sužadinimo rite sukeliamas kintamasis magnetinis srautas, keičia magnetinę medžiagos varžą, leisdamas statiniam srautui tekėti į ir iš stipino, proporcingai kintamajai magnetinei varžai. Dėl statinio ir kintamojo srautų sąveikos įtakos antrinėje ritėje gaunamas perkeltos kitimo ašies rezultatas, t. y. atsiranda pastovioji magnetinio srauto dedamoji, apie kurią kinta įmagnetinimo jėga. Pastoviosios

dedamosios dydis priklauso nuo kampo tarp Žemės lauko komponentės *H* ir detektoriaus ašies. Tai grafiškai parodyta 1.4.23 pav., b.

Jei uždėsime grafikus iš 1.4.22 pav. ant 1.4.23 pav., b, tai gausime rezultatą, kuris atvaizduotas 1.4.24 pav. Pastebėsime atsiradusį srauto bangų viršūnių plokštėjimą. Taip yra dėl to, kad pirminės ritės amplitudės sužadinimo srovė yra priderinama taip, jog bet koks nulinės atskaitos ašies perkėlimas sukelia detektoriaus medžiagos magnetinį prisotinimą. Taigi teigiamas nulinės atskaitos perkėlimas prisotina medžiagą ir sukelia teigiamųjų viršūnių plokštėjimą. Lygiai taip pat ir neigiamosios viršūnės bus suplokštinamos dėl neigiamojo nulinės atskaitos linijos perkėlimo, kuris prisotina medžiagą kitame *B*/*H* kreivės gale.

Sumarinis srautas, susietas su antrine rite, yra kaip ir anksčiau suma srautų atskirose alkūnėse (1.4.23 pav.). Kai srauto detektorius pasukamas kitomis kryptimis, artimomis Žemės lauko *H* krypčiai, tada priklausomai nuo kampo suminio srauto vertės įdubimai tampa gilesni ir lėkštesni. Tokiu būdu pasiekiami norimi pokyčiai ir sužadinama įtampa antrinėje ritėje. Šios įtampos dydis priklauso nuo su statiniu srautu susieto srauto pokyčio, t. y. priklauso nuo statinio srauto stiprumo.

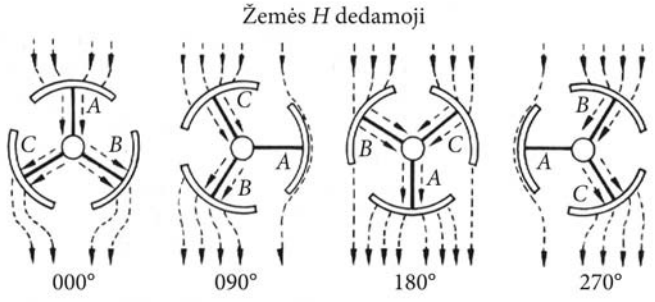


1.4.24 pav. Sumarinis magnetinis srautas ir sukeliama Žemės H dedamoji e.v.j.

Taip pat reikia atkepti dėmesį į antrinėje detektoriaus ritėje indukuotos išėjimo įtampos ir pirminėje sužadinimo ritėje generuojamos įtampos dažnių santykį. Per kiekvieną pirminės įtampos periodo pusę srauto detektoriaus medžiagos „pasipriešinimas“ kinta nuo maksimalaus iki minimalaus dydžio, ir atvirkščiai, todėl tekėdamas per medžiagą statinis srautas kerta ritę du kartus. Taigi kiekvienu sužadinimo pusės periodo metu ritėje vyksta du srovės krypties pokyčiai, arba kiekvieną pilną pirminį sužadinimo įtampos periodą atitinka du pilni periodai indukuojamos antrinės ritės išėjime e.v.j. Sužadinimo įtampa turi 400 Hz dažnį, o sužadinta antrinėje ritėje atstojamoji e.v.j. turi 800 Hz dažnį, kaip parodyta 1.4.24 pav. Jos amplitudė yra tiesiogiai proporcinga Žemės magnetinės horizontaliosios *H* dedamosios krypčiai.

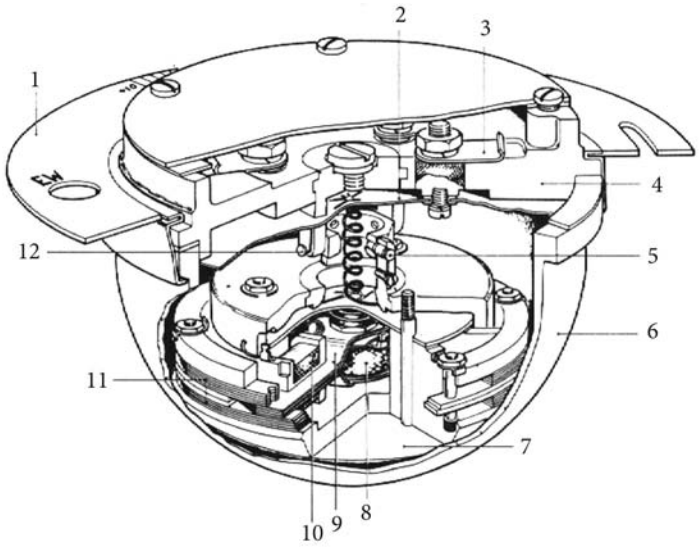
Išsiaiškinus, kaip veikia viena magnetinio srauto detektoriaus dalis, reikia panagrinėti, kaip veikia trys. Jei turime omenyje, kad srauto tankis yra proporcingas magnetinio kurso kosinusui, tai akivaizdu, kad vienam srauto detektoriui teks du kursai, atitinkantys nulinę reikšmę ir du maksimumus. Jei paimtume voltmetrą, tai abiem atvejais jis rodytų tą pačią įtampą. Taip yra todėl, kad prietaisas neatskiria

įtampos fazės. Bet kuriai kitai krypties reikšmei teks keturios reikšmės, atitinkančios vieną rodmenį voltmetre. Tačiau, panaudojant tris magnetinio srauto detektorius, pasuktus kas 120° vienas kito atžvilgiu, galima gauti vienareikšmį rezultatą. Tai parodyta 1.4.25 pav. Atstojamoji trijų detektorių įtampa bet kuriuo momentu gali būti atvaizduota vienetiniu vektoriumi, kuris yra lygiagretus su Žemės magnetine komponente *H*.



1.4.25 pav. Žemės magnetinio lauko krypties nustatymas keturiais detektoriais

1.4.26 pav. pateiktas magnetinio-indukcinio kurso daviklio konstrukcijos pjūvio vaizdas.



1.4.26 pav. Magnetinio-indukcinio kurso daviklio konstrukcija: 1– montavimo antbriaunis; 2 – kontaktų grupė; 3 – išėjimo elektrinis gnybtas; 4 – dangtis; 5–12 – ašys; 6 – dubuo; 7 – švytuoklės atsvaras; 8 – pirminė (sužadinimo) ritė; 9 – rato pavidalo magnetinio srauto krypties daviklis; 10 – antrinė (išėjimo) ritė; 11 – kolektoriaus svirtis

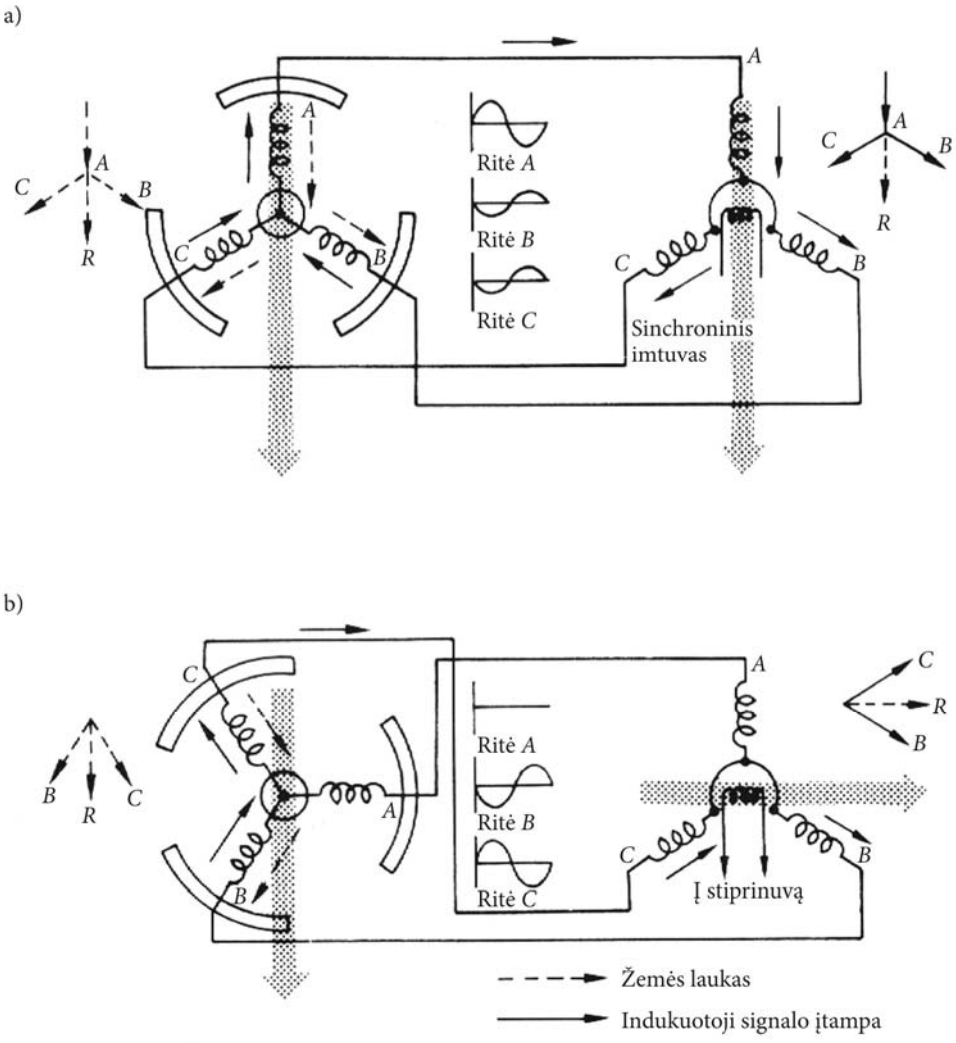
Detektoriaus stipinų ir ričių mazgai yra susieti taip, kad nebūtų jokių laisvumų azimuto paklaidoms horizontaliojoje plokštumoje, o vertikaliojoje plokštumoje lestini tik tam tikri laisvumo laipsniai polinkiui ir posvyriui tam, kad būtų pasiekiama maksimali daviklio reakcija į Žemės magnetinio lauko dedamosios *H* poveikį. Dubuo, kuriame yra sandariai įtvirtintas daviklis, iš dalies pripildytas skysčio, kad slopintų vibracijas. Prietaisas tvirtinamas orlaivio sparne ar vertikaliojo stabilizatoriaus gale.

Giroskopas ir rodytuvo kontroliavimas. Kompaso krypties rodytuvo kontroliavimas – tai procesas, kai magnetinio kurso duomenys, nustatyti magneto-indukciniu krypties davikliu, nuotoliniu būdu perduodami į giroskopinį krypties indikatorių kiekybinei kurso indikacijai palaikyti. Kurso padėties nuotolinio perdavimo principas iš esmės yra vienodas visų tipų kompasų sistemoms ir pavaizduotas 1.4.27 pav. pateikta schema.

Kai magnetinio srauto daviklis nustatytas nenukrypstamai vienu kursu, pavyzdžiui, 000°, tai ritėje A (1.4.27 pav., a) sužadinama maksimali įtampa, o ritėse B ir C indukuojami signalai su dvigubai mažesne amplitude ir priešingomis fazėmis. Šie signalai tiekiami į atitinkamus sinchroninės informacijos perdavimo sistemos imtuvo statoriaus kontaktus, kur jais sukeliami magnetiniai srautai sukuria atstojamąjį mag-

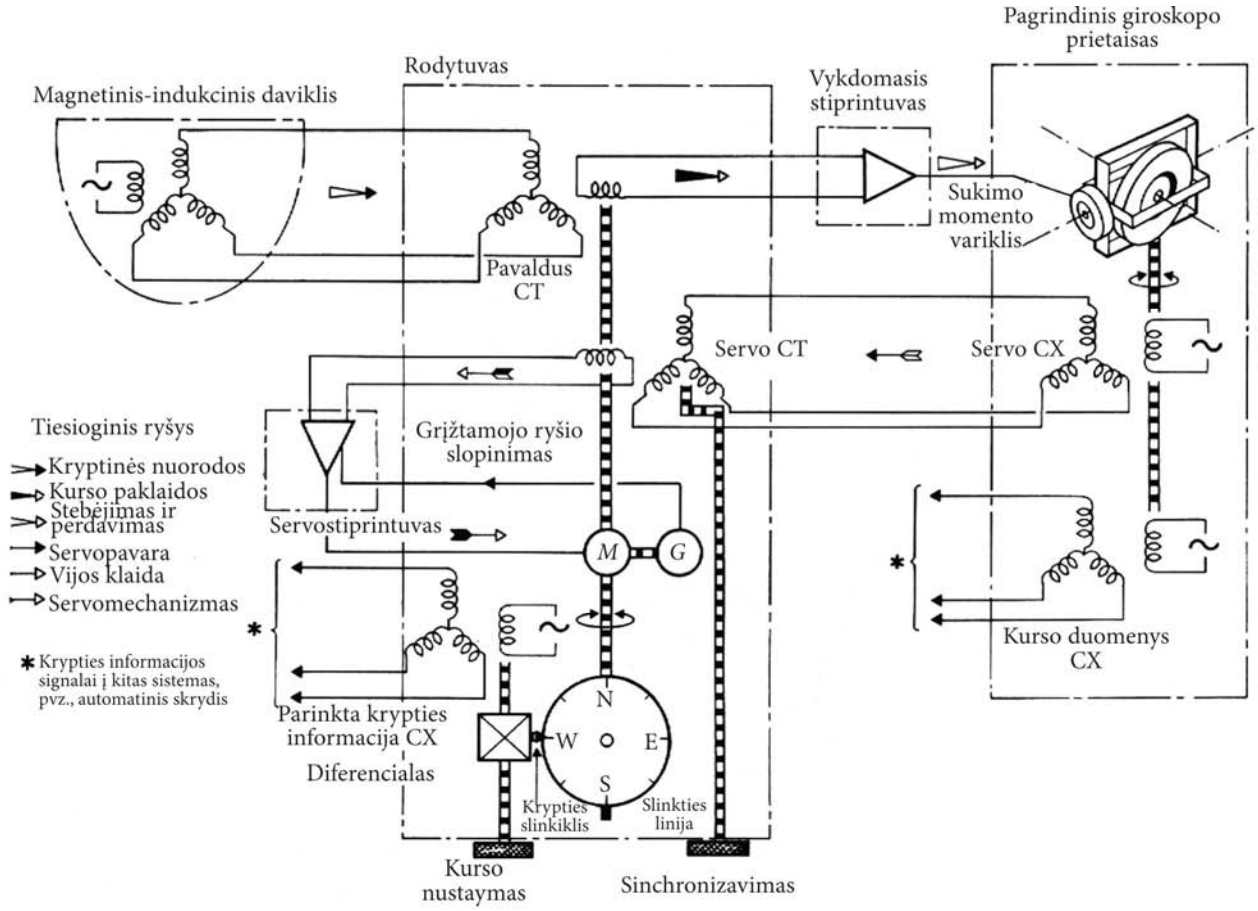
netinį lauką, nukreiptą skersai statoriaus centro. Šis atstojamasis laukas lygiuojasi su atstojamuoju Žemės lauku, kuris kerta detektorių. Jei, kaip parodyta 1.4.27 pav., a sinchronizacijos sistemos imtuvo rotorius yra stačiuoju kampu į atstojamąjį lauką, tai įtampa apvijose negali būti sužadinta. Šioje padėtyje sinchronizacijos įtaka yra „nulinėje“ padėtyje ir krypties giroskopas irgi lygiuojasi su Žemės atstojamojo lauko vektoriumi ir kursą nustatantis prietaisas rodo 000°.

Kai magnetinio srauto daviklis pasukamas 90° kampu, ritė reaguoja, kaip parodyta 1.4.27 pav., b. Ritėje A įtampa nesužadinama, o ritės B ir C turi padidėjusias įtampas, be to, ritėje C signalas yra priešingas nei buvo nulinėje padėtyje. Atstojamasis srautas, kertantis sinchronizacijos imtuvo statorių, bus pasisukęs 90°, o giroskopas ir sinchronizacijos imtuvas išliks savo pradinėse padėtyse. Šiuo atveju sinchronizacijos sistemos imtuvo statoriuje sukeltas magnetinis srautas bus vienoje linijoje su jo rotoriumi ir rotoriaus apvijoje (1.4.27 pav., b) indukuosis paklaidos įtampa. Ši paklaidos įtampa tiekiama į valdomąjį stiprintuvą, kuriame palaikoma jos faze, ir po sustiprinimo tiekiama į valdomąjį variklį, kuris koreguoja giroskopą ir suka sinchronizatoriaus rotorių reikiama kryptimi, kol rotorius pasiekia „nulinę“ padėtį. Kitais žodžiais tariant, kompaso sistemos stabilizacijos sąlygos 90° pakitusiam kursui bus lygiai tokios pačios, kaip ir 1.4.27 pav., a pateiktoje diagramoje.



1.4.27 pav. Krypties giroskopo nuotolinis valdymas

Praktikoje lauko sukimasis sinchronizacijos imtuve ir giroskope vyksta tuo pačiu metu, kaip ir srauto detektoriaus posūkis, todėl sinchronizacija tarp detektoriaus ir giroskopo palaikoma realiame laiko mastelyje. Sinchroniškas perdavimas tarp trijų principinių komponentų pagrindinio giroskopo sistemoje pavaizduotas 1.4.28 pav.



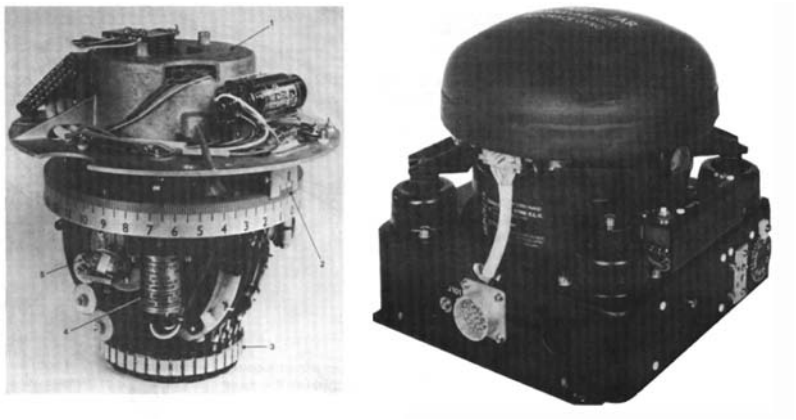
1.4.28 pav. Pagrindinis giroskopas ir indikatoriaus vaizdavimas

Pagrindinis (jau apibūdintas) sinchronizavimo principas tinka šiai nuotolinio nuskaitymo kompaso sistemai, kai indikatorius yra atskiras įrenginys, tačiau svarbu įvesti papildomą sinchronizaciją į šią sistemą, norint suformuoti servokontūrą su grįžtamuoju ryšiu. Sinchronizacijos siųstuvo rotorius CX sukamas, kai tik pasisuka giroskopas, o signalai, sukelti CX sinchronizacijos kontūro statoriuje, tiekiami per CT į rodytuvą. Vykstant valdymui, abiejų sinchronizatorių rotoriai bus netapatūs ir servo kontūro paklaidos įtampa, sukuriama CT sinchronizatoriaus rotoriuje, tada bus tiekiama į servo stiprintuvą. Sustiprinta paklaidos įtampa valdo servo variklį, kuris mechaniškai sutapatinamas su CT rotoriumi ir krypties indikatoriaus ciferblatu. Tokiu būdu rotorius ir ciferblatas yra sukami, o pastarasis nurodo krypties pokyčius. Perduodamas sukimą rotorius pasiekia nulinę reikšmę ir kai nebebus signalo į servo stiprintuvą, tada servo variklis nustoja suktis ir ciferblatas rodo naują kryptį. Servo variklis taip pat suka tachogeneratorių, kuris tiekia grįžtamuosius signalus stiprintuvui, kad nuslopintų bet kokius servo sistemos svyravimus.

Krypties giroskopo mazgas. Priklausomai nuo kompaso sistemos tipo ir jo naudojimo būdo, krypties giroskopo mazgas gali būti sumontuotas kabinos prietaisų skyde arba atskirame valdančiame įrenginyje, kuris yra kitoje orlaivio vietoje ir perduoda krypties informaciją valdomam rodytuvui. Šios sistemos su valdomuoju indikatoriumi ir valdančiuoju nuotoliniu krypties giroskopo mazgu naudojamos dažniau, nes, perduodant skrydžio kurso informaciją ir siekiant padidinti jos efektyvumą, vis dažniau prisijungiama prie skrydžio valdymo komandinės ir automatinio skrydžio valdymo sistemų.

Pavyzdžiui, 1.4.29 pav. parodytas valdantysis krypties giroskopo konstrukcinis mazgas. Sferinės formos giroskopo rotorius įtvirtintas vidiniame kardaninės pavaros rėme ir uždengtas pusrutulio formos dangteliu. Ši konstrukcija yra užpildyta heliu ir visiškai užsandarinta. Pagrindinio krypties valdymo sinchronizatoriaus ir papildomo rodmenų informacijos perdavimo sinchronizatoriaus rotoriai sumontuoti virš giroskopo pakabos išorinio rėmo. Horizontaliosios padėties korekcijos variklio statorius pritvirtintas giroskopo kardaninės pavaros išorinio rėmo apačioje, o jo rotorius – prie giroskopo gaubto. Korekcijos variklį valdo ant vidinio pavaros rėmo ašies esantis skystinis lygio jungiklis. Kurso apskritoji skalė (cifer-

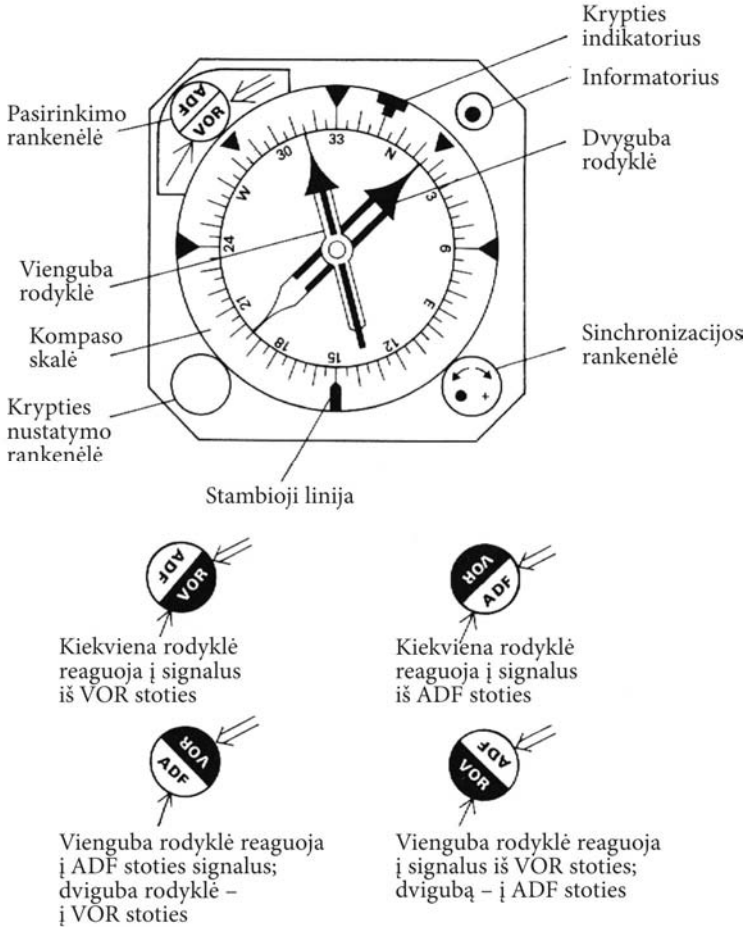
blatas) taip pat yra prie išorinio pavaros rėmo šalia patikslinančios nonijaus skalės. Abi skalės matomos per kontrolės langelį išoriniame giroskopo gaubte ir naudojamos krypties informacijai gauti, testuojant įrangą orlaivyje. Mazgas įtaisytas ant vibracijas slopinančio pagrindo, kuris leidžia montuoti įtaisą reikalingoje vietoje, kad būtų galima prijungti visas reikiamas elektros grandines.



1.4.29 pav. Pagrindinio kryptinio giroskopo mazgo pavyzdys

Krypties rodytuvas. Rodytuvo, naudojamo su kryptiniu giroskopu, ciferblatas parodytas 1.4.30 pav.

Papildomai magnetinio kurso duomenims atvaizduoti jame taip pat rodomas orlaivio azimutas, nustatomas pagal radijo navigacinių sistemų antžemines stotis, tokias kaip automatinis krypties ieškiklis ADF (*Automatic direction finder*) ir aukštojo dažnio visakryptis radijo švyturys VOR (*Very high-frequency Omnidirectional Range*). Dėl šios priežasties šis kurso rodytuvas vadinamas radiomagnetiniu rodytuvu RMI (*Radio magnetic indicator*).

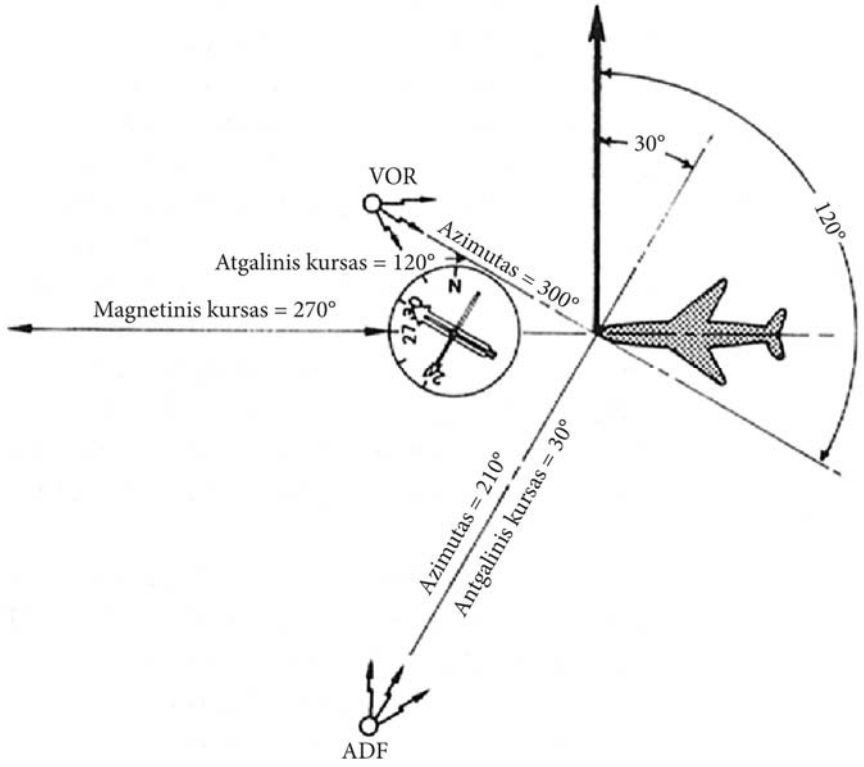


1.4.30 pav. Krypties rodytuvas

Azimutas rodomas dviem koncentriškai sumontuotomis rodyklėmis. Viena vadinama dviguba, o kita – vienguba. Abi rodyklės yra priekinėje kompaso rodytuvo dalyje ir yra nustatomos sinchronizatorių, kurie prijungti prie orlaivyje esančių ADF ir VOR imtuvų. Rodytuvas valdomas rankiniu būdu parinkimo rankenėlėmis. Siunčiami signalai į sinchronizatoriaus sistemas yra tokie, kad rodyklės visada rodytų į stotis, iš kurių gaunami signalai. Tai galima pamatyti 1.4.31 pav. pateiktoje schemoje, kur parodyta, kaip orlaivio vieta gali būti nustatyta iš trijų navigacinės informacijos šaltinių.

Jei pilotas nori nustatyti kryptį, į kurią turi būti nuskraidintas orlaivis, yra tam numatyta rankenėlė („Nustatyti kryptį“). Ji mechaniškai sujungta su krypties žymekliu taip, kad kai sukama krypties rankenėlė, sukasi ir žymeklis. Orlaivis tada yra sukamas tol, kol nauja pasirinkta kryptis užfiksuojama prieš žymeklį. Kai sukama, esant įjungtam automatinio skrydžio valdymo režimui, krypties nustatymo rankenėlės sukimasis perduodamas CX sinchronizatoriaus rotoriui (1.4.28 pav.), tiekiančiam jo sukimo komandos signalus į autopiloto sistemą.

Giroskopo stabilizavimas. Papildomai prie veiksmingų sinchroninių perdavimo sistemų panaudojimo taip pat svarbu turėti sistemą, kuri visą laiką palaikytų giroskopo sukimosi ašį horizontaliojoje padėtyje. Šis reikalavimas visiems krypties giroskopams yra esminis, siekiant išvengti atsitiktinių deviacijų (1.3.6 poskyrį), dėl giroskopo rotoriaus nišos guolių trinties.

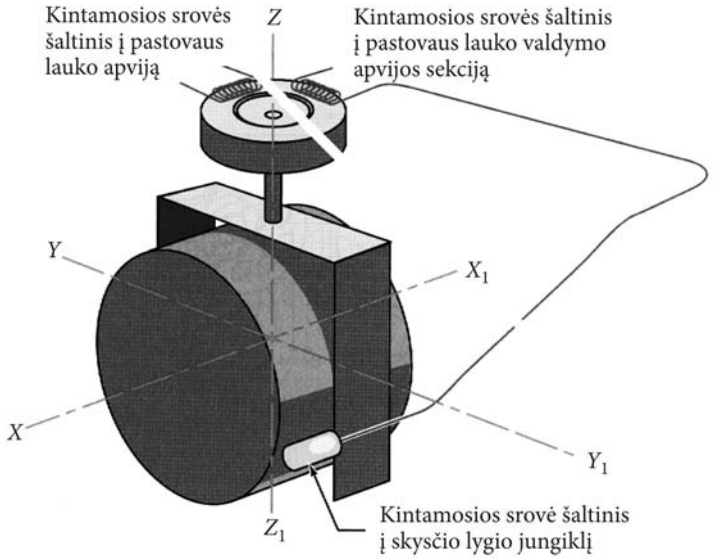


1.4.31 pav. Radiomagnetinio indikatoriaus (RMI) veikimo pavyzdys

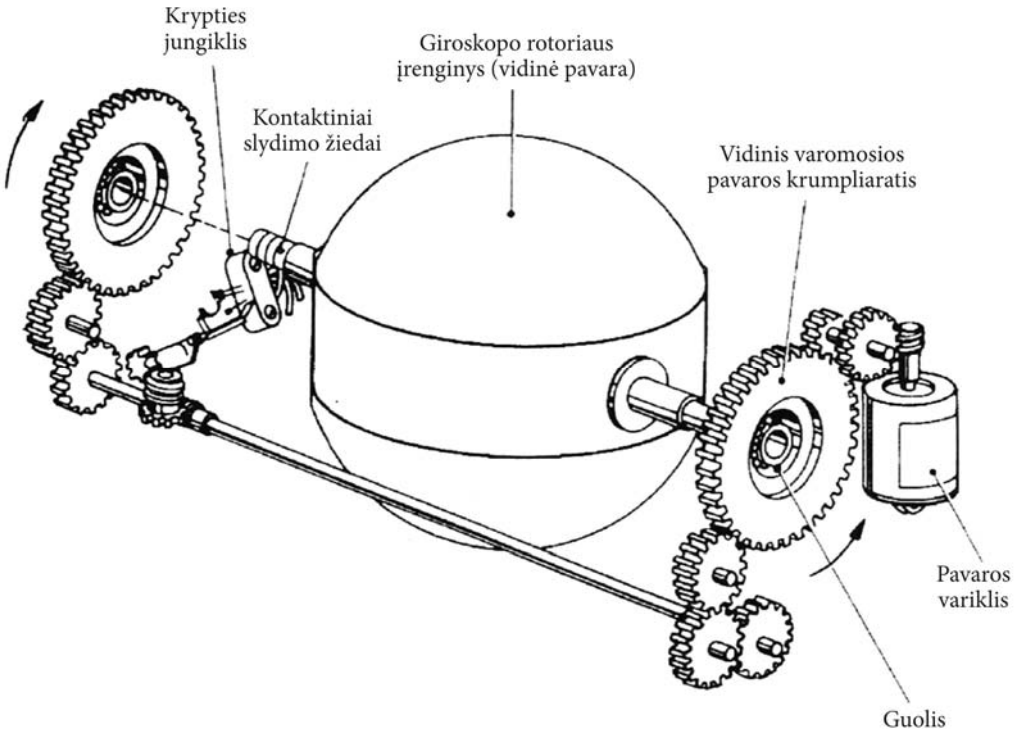
Nuotolinio nuskaitymo kompasų giroskopuose naudojamos padėties stabilizavimo sistemos yra analogiškos anksčiau nagrinėtosioms (žr. 1.3.2 poskyrį), jos susideda iš jungiklio ir korekcijos variklio. Skysčio lygio tipo jungiklis paprastai montuojamas ant giroskopo rotoriaus korpuso taip, kad judėtų kartu su juo. Korekcijos variklis yra dviejų fazių indukcinis variklis, įtaisytas taip, kad jo statorius būtų sujungtas su giroskopo išorinės kardinės pakabos rėmu, o rotorius – su giroskopo korpusu. 1.4.32 pav. parodytas sistemos išdėstymas. Vienas jungiklio elektrodas sujungtas su kintamosios srovės šaltiniu, o kitas – su variklio valdymo apvija.

Kaip parodyta paveiksle, valdymo apvija yra sudaryta iš dviejų dalių: viena pastoviai maitinama, o kita maitinama tik tuo metu, kai skystinis lygio jungiklis sujungia. Sukeliami srovių dviejose apvijose indukciniai laukai sukuria variklio sukimo momentą, kurio kryptis priklauso nuo skystinio lygio jungiklio polinkio krypties.

Norint panaikinti giroskopo kardaninės pavaros sistemos guolių trinties įtaką krypties nustatymo tikslumui, naudojama tokia sujungimo krumpliaračių konstrukcija (1.4.33 pav.). Vidinis kardaninės pavaros rėmas sujungiamas su išoriniu pavaros rėmu, naudojant specialius dvigubus sukamuosius guolius (1.4.16 pav.). Vidiniai guolių žiedai, giromazgo pakabos kairėje ir dešinėje ašies pusėse sukami į skirtingas puses pavaros varikliu, kuris veikia per dantračių pavarą. Išorinio rėmo sukimo ašis įtvirtinta guoliuose, kurių išoriniai žiedai pagrindo atžvilgiu nejuda. Vidurio žiedo sukimasis nekintamai paskirsto guolių trintį aplink sukimosi ašį, todėl į priešingas puses veikiančios dviejų guolių trinties jėgos likviduoja viena kitą. Guolių sukimosi krypties reversinis valdymas atliekamas, keičiant pavaros variklio sukimosi kryptį per kumšteliais valdomą jungiklį. Kumšteliai yra ant tarp dviejų dantračių besisukančios ašies. Prie jungiklio kontaktų prijungti kondensatoriai pašalina kibirkščiavimo tikimybę.



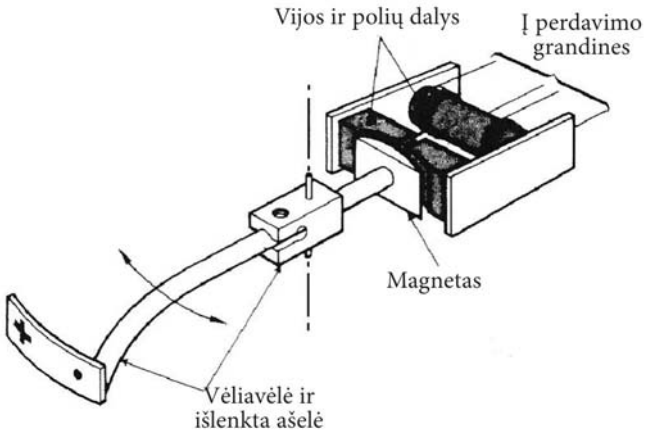
1.4.32 pav. Stabilizavimo sistema



1.4.33 pav. Krumpliaračių sistema

Kompaso sistemų valdymo režimai. Visos kompasų sistemos veikia dviem funkciniais metodais: ***valdymo*** – kada krypties giroskopas yra koreguojamas (valdomas) magnetoindukciniu krypties davikliu, ir ***laisvojo giroskopo***, arba **D.G.**, kada giroskopinis krypties rodiklis yra izoliuotas nuo magnetoindukcinio krypties daviklio, kad veiktų tik kaip krypties giroskopas. Pastarasis funkcinis metodas naudojamas, kai atsiranda krypties korekcijos signalo grandinės veikimo sutrikimai arba kai orlaivis skrydis yra platumose, kur horizontali Žemės magnetinio lauko dedamoji *H* neatitinka standartų.

Sinchronizavimo atvaizdavimas. Tokių pranešiklių arba informatorių paskirtis yra rodyti, ar kompaso sistemos giroskopas yra sinchronizuotas su magnetinio kompaso kryptimi, perduodama iš magnetoindukcinio krypties daviklio. Informatoriai gali būti integruojami pagrindiniame krypties rodytuve (1.4.34 pav.) arba gaminami kaip atskiri elementai, montuojami prietaisų skydelyje. Tokie elementai sužadinami signalais iš krypties daviklio ir yra sujungti su antrine giroskopo grandine.



1.4.34 pav. Tipinis neatsiejamas pranešiklis

Tipinis 1.4.34 pav. parodytas informatorius naudojamas krypties rodytuvo funkcionavimo režimui iliustruoti. Jis susideda iš mažos vėliavėlės, ant kurios pažymėtas taškas ir pliusas, matomi per mažą langelį viename krypties rodytuvo kampe. Vėliavėlė yra pritvirtinta viename išlenktos ašies gale, o kitame – nuolatinis magnetas, priglaustas prie perdavimo grandinių prijungtų dviejų vijų. Kai giroskopas nesinchronizuojamas, valdymo signalų srovė teka per pranešiklio apvijas ir indukuoja jose magnetinį lauką. Laukas veikia nuolatinį magnetą, kuris palenkia ašelę taip, kad taškas arba pliusas atsiranda langelyje. Rodoma žymė priklauso nuo krypties, į kurią sukamas giroskopas, ir išlieka iki sinchronizacijos atsistatymo. Esant sinchronizacijai, pranešiklio langelis turėtų būti visiškai tuščias.

Rankinė sinchronizacija. Kai kompaso sistemoje, veikiančioje valdymo režimu, įjungiamas elektrinis maitinimas, giroskopo kryptis gali būti išsiderinusi. Giroskopas, žinoma, pradės sinchronizuotis, tačiau paprastai tai vyksta pakankamai lėtai (1° ar 2° per minutę), todėl nemažas laiko tarpas gali praeiti, kol įvyks sinchronizacija. Siekiant paspartinti šį procesą, sistemose įvedama galimybė atlikti greitą giroskopo krypties sinchronizavimą rankiniu būdu. Tokio sinchronizavimo principo veikimas parodytas 1.4.27 pav.

Stebint sinchronizavimo pranešiklio (1.4.34 pav.) padėtį, kuris susietas su valdomojo CT sinchronizatoriaus statoriumi, paspaudžiama rankinės sinchronizacijos rankenėlė ir pasukama į pranešiklio nurodytą kryptį. Tada CT sinchronizatoriaus statorius sukelia klaidos įtampos signalą rotoriuje. Šis signalas per servo stiprintuvą valdo variklį, kuris pasuka valdomąjį krypties sinchronizatoriaus rotorių ir giroskopą per valdomąjį stiprintuvą į padėtį, sutampančią su magnetinio-indukcinio daviklio kryptimi. Tuo pat metu, CT sinchronizatoriaus rotorius sukamas į nulinę padėtį ir visi klaidos signalai pašalinami.

Magnetinis kurso nustatymas poliariniuose regionuose. Esant reguliariems kariniams ir daugumai civilinių orlaivių skrydžių poliariniuose rajonuose kyla būtinybė tobulinti navigacinius metodus ir įrangą. Pagrindiniai navigaciniai sunkumai šiuose regionuose yra susieti su šiomis problemomis: tai meridianų ir izogonalių konvergencija, ilgi užtemimo periodai, ribojantys astronominės navigacijos panaudojimą, magnetinės audros ir radijo trukdžiai, ribojantys radijo navigacijos pagalbinių priemonių efektyvumą, bei tiesioginio ir nuotolinio nuskaitymo magnetinių kompasų sistemų apribojimai.

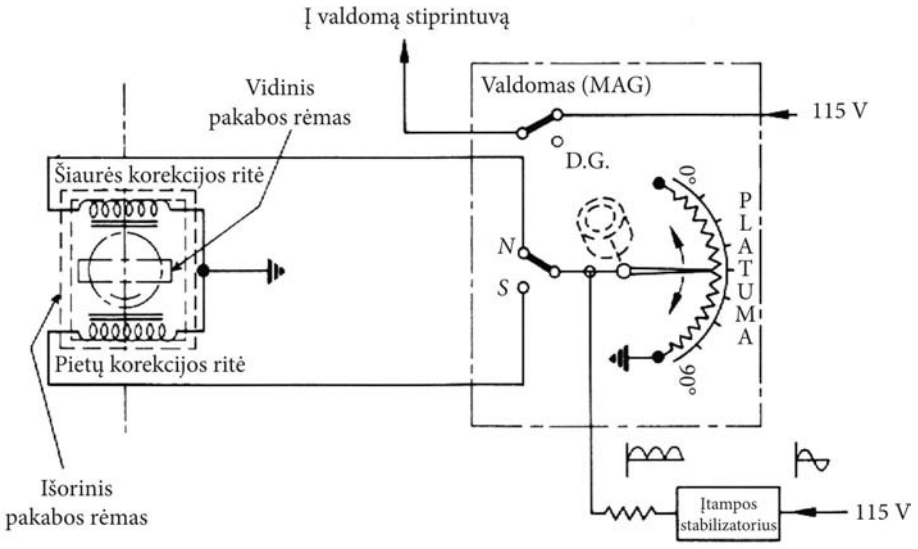
Kaip aprašyta 1.4.2 poskyryje, magnetinė Šiaurė negali būti nustatyta kaip tikslus taškas, bet gali būti apibūdinta kaip rajonas, kuriame Žemės magnetinio lauko horizontalioji dedamoji *H* yra lygi nuliui, t. y. visas laukas vertikalus. Suprantama, kad tiesioginio nuskaitymo ar nuotolinio nuskaitymo magnetiniai kompasai šioje vietovėje negali tiksliai nustatyti krypties. Kitas veiksnys, darantis magnetinį sukimąsi nepraktišką, yra tai, kad greta magnetinės šiaurės yra labai didelis magnetinės sistemos nuokrypis, žymiai kintantis, kintant atstumui nuo jos.

Šiuolaikinės giroskopinės kompasų sistemos, visiškai nepriklausančios nuo pavaros rėmo guolių trinties sukeliamų deviacijų, teikia galimybę šioms problemoms spręsti. Tačiau giroskopas turi Žemės paklaidą, kuri priklauso nuo platumos, kurioje yra giroskopas, o didžiausios paklaidos vis tiek yra ašigalių regionuose. Norint gauti tikslią krypties informaciją, paklaidos turi būti eliminuotos, jas apskaičiuojant ir tiesiogiai atliekant kurso stebėjimo metu gautų duomenų pataisas arba sujungiant giroskopą su automatizuotu koregavimo įtaisu. Kompasų sistemose, skirtose poliarinių regionų navigacijai, automatizuoto koregavimo būdas yra taikomas sudarant platumos pataisų įvedimo grandinę.

Tipinė automatizuota platumos pataisų įvedimo grandinė susideda iš trijų pagrindinių dalių:

1. Jungiklis, parenkantis pusrutulį, kuriame skrendama, pvz.: Šiaurės ar Pietų;
2. Pasirinkimo rankenėlė, potenciometras ir ciferblatas sukalibruotas platumos laipsniais, taip leidžiantis nustatyti platumą, kurioje bus skraidinamas orlaivis;
3. Trys nuolatinės srovės elektromagnetai, įmontuoti į išorinį kardaninės pakabos rėmą, ir vienas – bet kurioje vidinio pakabos rėmo pusėje.

Platumos valdymo grandinė pavaizduota 1.4.35 pav.



1.4.35 pav. Platumos valdymo grandinė

Kompasų sistemų paklaidos. Dėl statinių paklaidų nuotolinio nuskaitymo kompasų sistemose taip pat yra dvi pagrindinės metodinės paklaidos: pirmoji statinė, vadinamoji transmisijos paklaida, o kita – dinaminė, įvardijama kaip Koriolio paklaida.

Transmisijos paklaida atsiranda dėl kelių priežasčių: pavyzdžiui, jei sinchronizatoriaus vijų, sujungtų su krypties daviklio elementu, varžos yra netiksliai subalansuotos, išėjimo signalas bus paveiktas taip, kad sukels paklaidą, kuri svyruos per du teigiamuosius ir du neigiamuosius maksimumus 360° orlaivio posūkyje. Kitos transmisijos paklaidų priežastys yra įtampos nesubalansavimas pačiame krypties daviklio elemente ir sinchronizatoriaus statoriaus geometrinė asimetrija (pavyzdžiui, elipsė). Transmisijos paklaida paprastai kompensuojama dar gamyboje, įterpiant varžas tarp krypties daviklio elemento ir jam skirto krypties informacijos sinchronizatoriaus.

Koriolio paklaida atsiranda dėl įtempimo jėgos nukrypimo, esant sukimuisi apie Žemę kito judančiojo daikto atžvilgiu. Kalbant apie orlaivį skrydžio metu, visa tai būtų pavadinta Koriolio pagreičiu, sekant vingiuotu keliu iš vieno Žemės paviršiaus taško į kitą. Šis pagreitis sukelia švytavimus krypties daviklio elemente taip, kad horizontalė kirsis su Žemės lauko dedamąja *Z*. Ši komponentė, kaip nustatyta krypties

daviklio, suksis su orlaiviu, jam sukantis, ir generuos paklaidą, kuri bus didžiausia Šiaurės ir Pietų kryptimis. Paklaidos dydis priklausys nuo orlaivio Žemės greičio, kelio, platumos ir magnetinio nuosvyrio.

Dažniausiai naudojamas šios paklaidos koregavimo būdas yra kintamosios varžos rezistoriaus, valdomo platumos pasirinkimo rankenėle, įjungimas taip, kad dalytų įėjimą iš orlaivio Žemės greičio kitimo rezistoriaus. Gautas nuolatinės srovės signalas tiekiamas į krypties daviklį, kuriame jis sukuria lauką, kompensuojantį *Z* komponentę, kuri ir yra nuokrypio priežastis.

1.4.6. Orlaivio įsimagnetinimas ir jo įtaka kompasams

Pagal JAR privalomus reikalavimus tiesioginio nuskaitymo kompasas, kaip standartas, turi būti įrengtas visuose orlaiviuose tokioje vietoje, kur skrydžio įgula galėtų nesunkiai nuskaityti jo duomenis. Orlaivio patalpas supančios magnetinės medžiagos ir elektros grandinės veikia Žemės magnetinį lauką, dėl to kompaso rodyklė nukrypsta nuo vietinio magnetinio meridiano krypties. Šis efektas vadinamas kompaso deviacija, kurio rytinis arba vakarinis nukrypimo dydis nuo magnetinės Šiaurės priklauso nuo platumos ir orlaivio skrydžio kurso. Laimei, bet kokios nuokrypos gali būti išanalizuotos ir išskaidytos į išilgai pagrindinių orlaivio ašių veikiančias dedamąsias, kas padeda sumažinti sukeliamo efekto poveikį. Deviaciją sukeliančios priežastys yra analizuojamos ir atliekant kompaso svyravimus, nors likutinės nuokrypos vis dėlto išlieka ir yra įrašomos į paklaidų lentelę.

Orlaivio magnetizmo tipai. Orlaivio magnetizmas klasifikuojamas paprasčiausiu būdu: į kietosios arba minkštosios geležies magnetizmą (t. y. priklausomai nuo to, kaip lengvai medžiagos įsimagnetina).

Kietosios geležies magnetizmas. Ši magnetizmo forma yra ilgalaikio pobūdžio, tai lemia orlaivio konstrukcijoje, jėgainėje ir įvairioje įrangoje naudojamos geležinės bei plieninės dalys. Žemės magnetinis laukas per orlaivio konstrukciją veikia geležinių dalių molekulinę struktūrą, kai orlaivis ilgesnį laiką nekeičia savo krypties. Medžiagų daužymas ir apdirbimas, joms esant magnetiniame lauke, taip pat vaidina svarbų vaidmenį bendrajam orlaivio dedamųjų magnetizmui.

Minkštosios geležies magnetizmas. Ši magnetizmo forma yra trumpalaikio pobūdžio ir būdinga magnetiškai minkštoms, įmagnetinamoms Žemės magnetiniu lauku orlaivio dalims. Šio tipo magnetizmo sukeliamas poveikis priklauso nuo orlaivio skrydžio kurso, magnetinės platumos ir geografinės padėties.

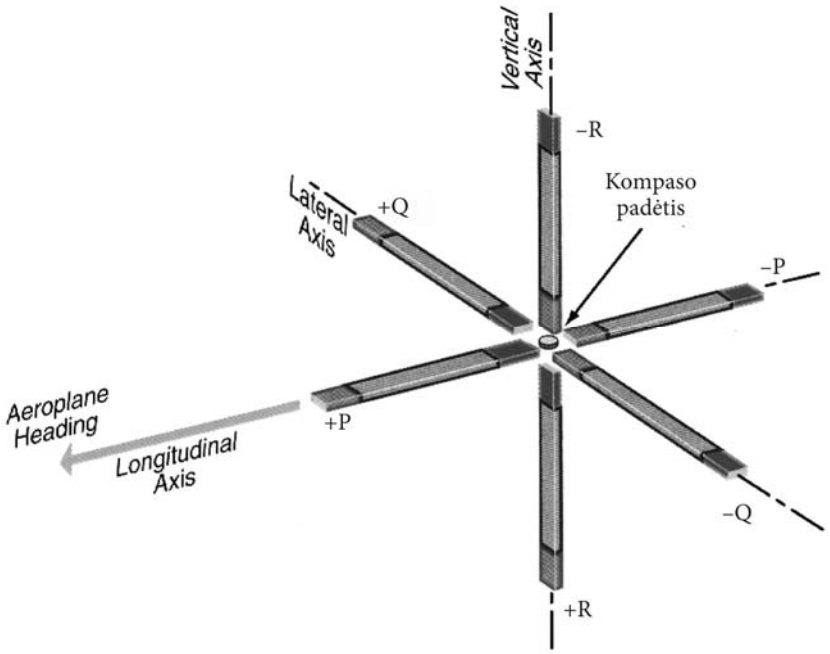
Paprastai orlaivio magnetizmo dedamosios, lemiančios kompasų nuokrypius (deviacijas), nurodomos raidėmis: didžiosios raidės rodo ilgalaikį kietosios geležies magnetizmą, o mažosios raidės – minkštosios geležies magnetizmą. Teigiamos nuokrypos (nukreipiančios kompaso rodyklę į dešinę) vadinamos rytinėmis, o neigiamos nuokrypos (nukreipiančios kompaso rodyklę į kairę) – vakarinėmis nuokrypomis.

Kietosios geležies magnetizmo dedamosios. Orlaivio kietosios geležies magnetizmo sukurtas suminis magnetinis laukas gali būti skaidomas į dedamąsias, kurias galima palyginti su kompaso vietos atžvilgiu išilgai, horizontaliai ir vertikaliai egzistuojančiais magnetais, atitinkamai įvardijamais kaip „*P*“ „*Q*“ ir „*R*“ dedamosios (1.4.36 pav.).

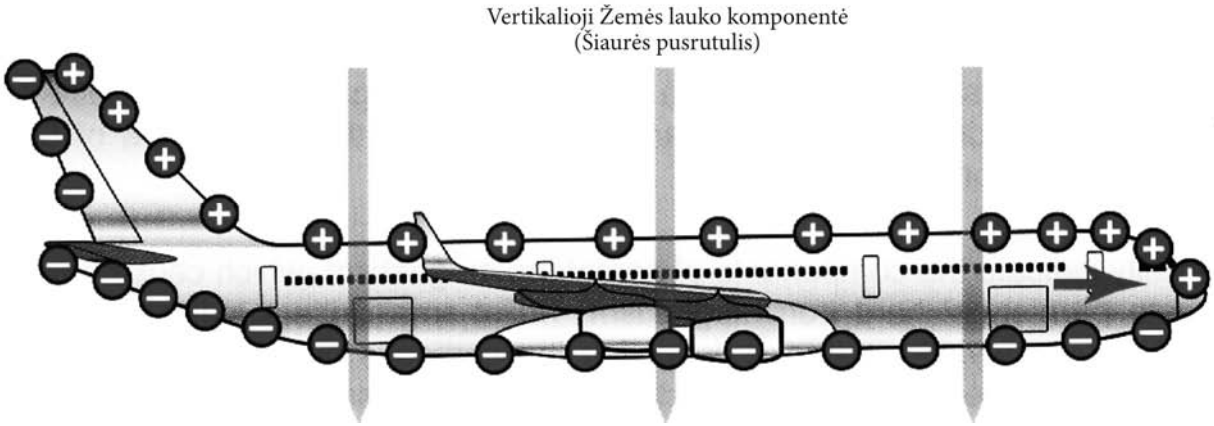
Nepriklausomai nuo orlaivio skrydžio kurso ar platumos šių dedamųjų magnetinis stiprumas išlieka pastovus, tačiau laikui bėgant dėl magnetizmo silpnėjimo orlaivyje gali keistis. Formaliai deviacija yra vadinama teigiama, jeigu orlaivio magnetinio lauko sukeltos deviacijos efektas verčia kompaso magnetinę sistemą suktis pagal laikrodžio rodyklę, o jos šiaurinį galą leistis žemyn. Tokia situacija susidaro, kai mėlynasis Šiaurinis polius yra priekyje ir į dešinę nuo orlaivio nosies. Tiesaus ir pastovaus skrydžio metu vertikali dedamoji (*R*) turi minimalią įtaką kompaso rodmenims, todėl nėra įvertinama atliekant kompaso deviacijos skaičiavimus, tačiau jos egzistavimą būtina suprasti.

Šiauriniame pusrutulyje esantis orlaivis turės Žemės magnetinio lauko sukeltą vertikaliąją įmagnetinimo dedamąją, kuri orlaivio korpuso viršuje bus poliarizuota teigiamai, o apačioje – neigiamai, kaip parodyta 1.4.37 pav.

Kai vertikalaus magnetizmo efektas analizuojamas išilginėje orlaivio ašyje, paaiškėja, kad poliarizacijos teigiamasis polius yra priekinėje orlaivio dalyje, o neigiamasis polius – užpakalinėje orlaivio dalyje. Panaši situacija egzistuoja skersai orlaiviuose su suminio poliariškumo priklausomybe nuo konkrečios orlaivio konstrukcijos. Magnetizmo poliariškumas ir stiprumas nepriklauso nuo orlaivio skrydžio kurso.



1.4.36 pav. Orlaivio magnetinio lauko dedamosios



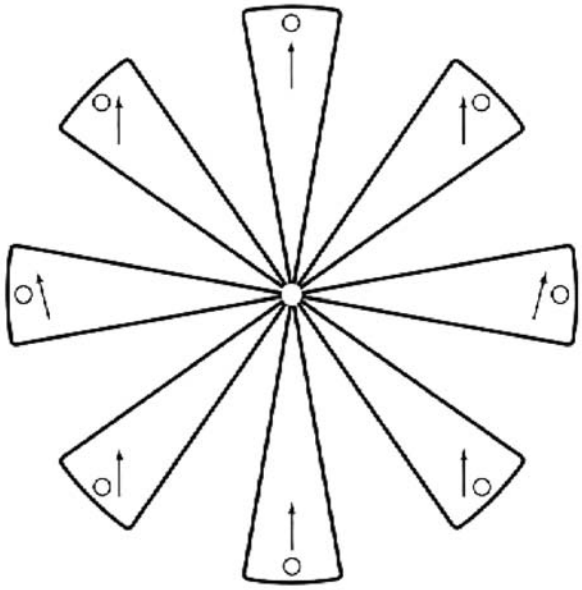
1.4.37 pav. Orlaivio įsimagnetinimas Šiaurės pusrutulyje

Orlaiviui skrendant šiauriniu kursu, įsivaizduojamas magnetas, susidaręs dėl *P* dedamosios, ir kompaso rodyklė yra vienoje linijoje su orlaivio išilgine ašimi ir Žemės kreipiamąja jėga (*H*). *P* yra pridedama arba atimama iš *H*, tačiau nelemia jokių nukrypimų. Jeigu orlaivis daro 360° posūkį, tai posūkiui prasidedant (nepaisant kompaso sukimosi ašies trinties, skysčio sūkurių ir t. t.) magnetinė sistema išlieka susieta su Žemės komponente *H*. *P* komponentė ir toliau veikia vienoje linijoje su išilgine orlaivio ašimi. Visa tai verčia kompaso rodyklę lygiuotis į sąlyginę poziciją tarp direktyvinės jėgos (*H)* ir nukreipiamosios jėgos (*P*), ir tai pasireiškia rodyklės nukrypimu keletu laipsnių į Rytus ar į Vakarus nuo Šiaurės, priklausomai nuo *P* poliariškumo (1.4.38 pav.).

Posūkio metu deviacijos reikšmės didėja, pasiekdamos didžiausius dydžius, skrendant Rytų ir Vakarų kryptimis, bei mažiausius dydžius, skrendant Šiaurės ir Pietų kryptimis. Teigiamos *P* dedamosios lemia deviaciją, išreiškiama sinuso fukcija (1.4.39 pav.).

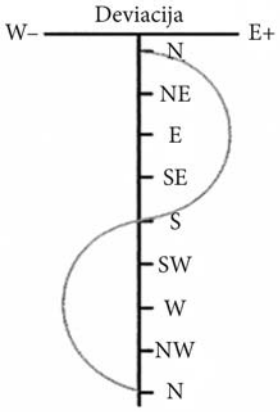
Tai rodo, kad *P* dedamosios sukelta deviacija yra proporcinga orlaivio kompaso kurso sinusui:

$$\text{Deviacija} = P \cdot \sin(\text{azimutas}). \qquad (1.4.5)$$



1.4.38 pav. Kompaso rodyklės nuokrypiai

Hdg (C)	Deviacija
N	Deviacija nėra, direktyvinė jėga padidėjusi
NE	Rytinė deviacija
E	Maksimali rytinė deviacija
SE	Rytinė deviacija
S	Deviacijos nėra, direktyvinė jėga sumažėjusi
SW	Vakarinė deviacija
W	Maksimali vakarinė deviacija
NW	Vakarinė deviacija



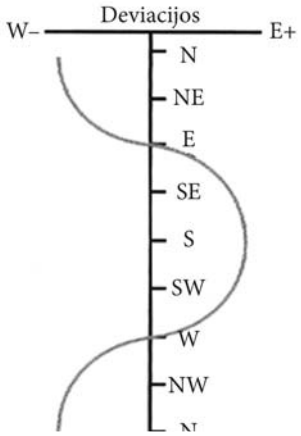
1.4.39 pav. Kompaso deviacijų, sukeliamų teigiamos *P* dedamosios, pobūdis

Dedamoji *Q* sukelia panašų efektą. Kadangi ji veikia pagal orlaivio skersinę (***Lateral***) ašį (*nuo sparnagalio iki sparnagalio*), tai šios dedamosios sukelta deviacija pasiekia didžiausias reikšmes, skrendant į Šiaurę ar į Pietus, ir mažiausias reikšmes, skrendant į Rytus ar į Vakarus (t. y. kai dedamoji yra vienoje linijoje su Žemės magnetinio lauko horizontalios dedamosios sukeliama jėga *H*). Neigiamos *Q* dedamosios sukeltos nuokrypos (teigiamasis polius į kairę nuo kompaso padėties), gali būti išreiškiamos kosinuso funkcija (1.4.40 pav.).

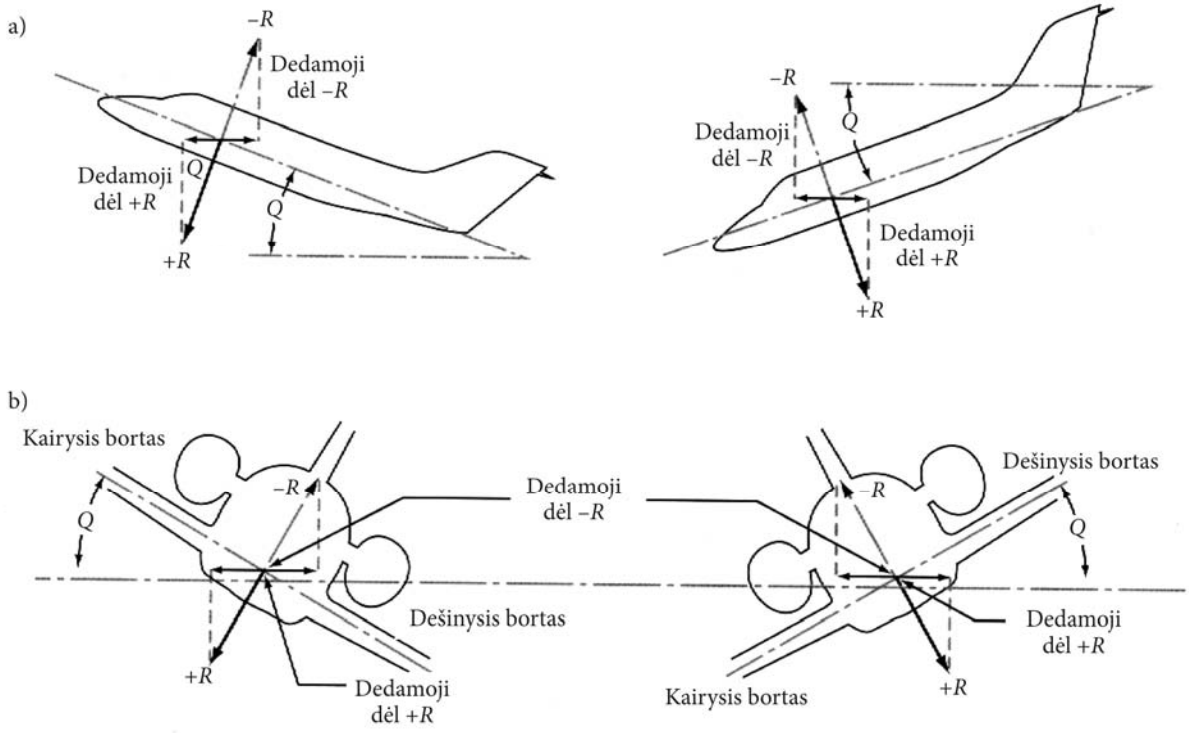
Tai rodo, kad deviacija, sukelta dedamosios *Q*, proporcinga orlaivio kompaso kurso kampo kosinusui:

$$\text{Deviacija} = P \cdot \cos(\text{azimutas}). \qquad (1.4.6)$$

Dedamoji *R* orlaivį veikia vertikaliai, todėl neturi jokios įtakos kompasų sistemai, kai orlaivis skrenda tiesiai. Skrydžio metu, orlaiviui neišlaikant išilginių ir šoninių ašių horizontalioje padėtyje, dedamoji *R* nukrypsta nuo vertikaliosios padėties ir atsiradęs šios dedamosios horizontalusis vektorius veikia kompasų magnetinę sistemą. 1.4.41 pav. vaizdžiai parodo, kaip dedamoji *R* veikia kitas dedamąsias (*P*, *Q*).



1.4.40 pav. Kompaso deviacijų, sukeliamų neigiamos *Q* dedamosios, pobūdis



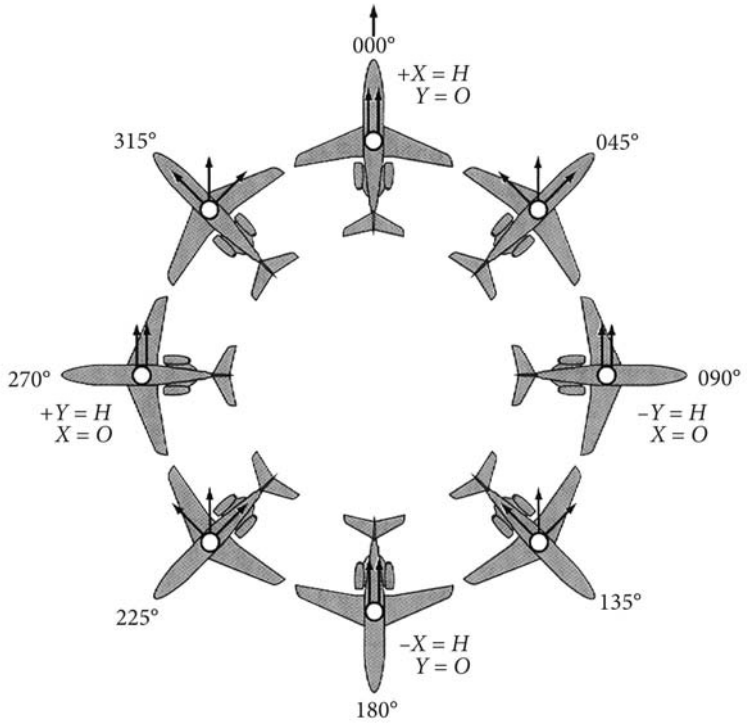
1.4.41 pav. Deviacijos dedamosios *R* įtaka dedamosioms *P* ir *Q*

Tokios situacijos dažnai pasireiškia orlaiviams su galine važiuokle, jiems esant ant Žemės. Orlaiviui aukštėjant ar žemėjant, dedamosios *R* vertė gali kisti, bet kadangi susidarantys kampai yra palyginti maži, tai ir dedamosios *R* sukeliama deviacija bus pakankamai maža. Reikšmės praktiškai neturi ir posūkių metu dėl dedamosios *R* atsiradusios ir su tiesioginio nuskaitymo kompasu susijusios posūkių ir pagreičių paklaidos. Dedamosios *R* sukeliamas efektas yra nežymus ir nuotolinės indikacijos kompasuose, kadangi posūkių paklaidos yra pašalinamos prietaiso elektronine schema.

Minkštosios geležies magnetizmo dedamosios. Kompaso aplinkoje egzistuojantis minkštosios geležies magnetizmas gali būti kildinamas iš greta kompaso esančių minkštosios geležies strypų, įmagnetintų Žemės magnetinio lauko. Šis laukas turi dvi dedamąsias *H* ir *Z*, tačiau patogesnei analizei dedamoji *H* išskaidoma į dar dvi horizontalias dedamąsias *X* ir *Y*. Sujungus šias dedamąsias su Žemės magnetinio lauko dedamąja *Z*, jos tiesiogiai atitinka orlaivio trijų ašių koordinačių principą. 1.4.42 pav. diagrama rodo, kaip keičiasi *X* ir *Y* poliariškumas bei veikimo jėga, kintant orlaivio kursui, kai šis sukasi atitinkamai pagal dedamosios *H* kryptį.

Dedamoji *Z* kompasą veikia vertikaliąja kryptimi, todėl nesukelia jokio poveikio magnetų sistemos kryptinėms savybėms. Visos trys minkštojo geležies magnetizmo dedamosios keičiasi tik pasikeitus Žemės magnetinio lauko veikimo jėgai ir krypčiai, orlaiviui perskridus į kitą geografinę vietą. Dedamosios *Z* ženklas keičiasi tik orlaiviui perskridus į kitą magnetinį pusrutulį.

Pagrindinės kompasą veikiančios minkštosios geležies dedamosios žymimos mažosiomis raidėmis *c*, *f* ir yra susijusios su Žemės lauko dedamosiomis *X*, *Y* ir *Z*. Iš šių dedamųjų svarbiausios yra *cZ* ir *fZ*, kadangi jų poliariškumas nepriklausomai nuo orlaivio kurso išlieka toks pats. Šios dedamosios veikia tokiu pačiu principu, kaip ir kietosios geležies dedamosios *P* ir *Q*. Skersai ir išilgai kompaso atžvilgiu išdėstytos vertikalios minkštosios geležies strypų poros sukelia atitinkamai *cZ* ir *fZ* dedamąsias. Šiaurės (magnetiniame) pusrutulyje apatinis kiekvieno strypo polius yra paveiktas „raudonojo“ magnetizmo.



1.4.42 pav. Minkštosios geležies dedamųjų įtaka orlaivio kursui

Deviacijos koeficientų nustatymas. Siekiant sumažinti kietojo ir minkštojo geležies magnetizmo poveikį orlaivio kompasui, būtina nustatyti orlaivio magnetizmo dedamųjų sukeltas deviacijas, esant įvairiems skridimo kursams. Deviacijos reikšmės gali būti analizuojamos pagal deviacijos koeficientus. Egzistuoja penki koeficientai – *A*, *B*, *C*, *D* ir *E*, iš kurių *E* ir *D* grynai minkštosios geležies pasekmė, todėl šie du koeficientai čia neaptariami. Likę koeficientai yra labai svarbūs orlaivio magnetizmui:

Koeficientas *A*

Šis koeficientas paprastai išlieka pastovus, esant bet kokiam orlaivio kursui, jį lemia orlaivio kompaso nesilygiavimas. Šiam koeficientui apskaičiuoti reikia rasti vienodais intervalais besiskiriančių kompaso kursų deviacijų algebrinės sumos vidurkį. Duomenys paprastai nuskaitomi nuo keturių pagrindinių ir keturių ketvirčių kursų:

$$Koefecientas\ A = \frac{deviacija\ nuo N + NE + E + SE + S + SW + W + NW}{8}. \qquad (1.4.7)$$

Koeficientas *B*

Šis koeficientas yra kietojo geležies komponentės *P* ir minkštojo geležies komponentės *cz* sukeltos deviacijos rezultatas, turintis didžiausią reikšmę skrendant į Rytus arba Vakarus. Šiam koeficientui apskaičiuoti reikia kompaso rytinio ir vakarinio kursų deviacijų algebrinį skirtumą padalyti iš dviejų:

$$Koefecientas\ B = \frac{Rytinė\ deviacija - Vakarinė\ deviacija}{2}, \tag{1.4.8}$$

bet kokiam kursui koeficientą B galima išreikšti taip:

$$Deviacija = B \cdot \sin(kursas). \tag{1.4.9}$$

Koeficientas *C*

Šis koeficientas yra kietojo geležies komponentės *Q* ir minkštosios geležies komponentės *fz* sukeltos deviacijos rezultatas, turintis didžiausią reikšmę, skrendant į Šiaurę arba Pietus. Šiam koeficientui apskaičiuoti reikia kompaso šiaurinio ir pietinio kursų deviacijų algebrinį skirtumą padalyti iš dviejų:

$$Koefecientas\ C = \frac{Šiaurinė\ deviacija - Pietinė\ deviacija}{2}. \tag{1.4.10}$$

Bet kokiam kursui koeficientą *C* galima išreikšti taip:

$$Deviacija = C \cdot \cos(azimutas). \tag{1.4.11}$$

Pilnoji nekoreguoto kompaso deviacija bet kokiam orlaivio kompaso kursui gali būti išreikšta:

$$Pilnoji\ deviacija = A + B \cdot \sin(azimutas\ s) + C \cdot \cos(azimutas). \tag{1.4.12}$$

Mažiausioji deviacija. Jeigu koeficientas *A* nepateiktas, tai mažiausioji deviacija bus, esant kursui, kai reiškinio $B \cdot \sin(azimutas) + C \cdot \cos(azimutas)$ reikšmė bus mažiausia:

$$\text{tg}\,(azimutas) = \frac{C}{B}. \tag{1.4.13}$$

Šitaip teisingai apskaičiuoti kursą galima iki didžiausių deviacijų, tačiau jeigu yra pateiktas koeficientas A, tai mažiausios deviacijos parametrai nustatomi pagal kompaso svyravimus.

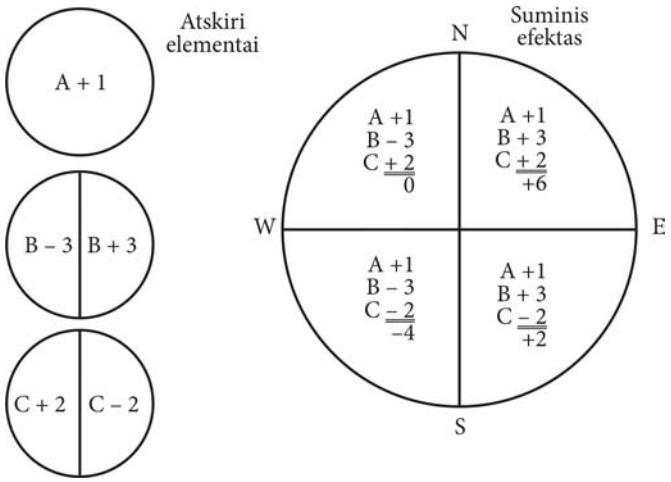
Didžiausioji deviacija. Jeigu dėl koeficiento *A* deviacija išlieka pastovi esant visoms kurso reikšmėms, tai didžiausioji deviacija bus, kai reiškinio $B \cdot \sin\ (kursas) + C \cdot \cos\ (kursas)$ reikšmė didžiausia:

$$\text{tg}\,(azimutas) = \frac{B}{C}. \tag{1.4.14}$$

Apskaičiuota didžiausiosios deviacijos reikšmė atitinka du abipusius kursus priešinguose ketvirčiuose, todėl teisingam kursui nustatyti būtina nusibraižyti svyravimų apskritimą (1.4.43 pav.).

Aukščiau esantis brėžinys iliustruoja sąlygas, kai koeficientai

$$A = +1;\ B = +3;\ C = +2.$$



1.4.43 pav. Svyravimų apskritimas

Didžiausioji deviacija tuomet bus Šiaurės Rytų ketvirtyje.

Tikroji reikšmė bus:

$$\mathrm{tg}\frac{B}{C}=\frac{3}{2}=1{,}5,$$

kas atitinka didžiausios deviacijos kursą, lygų 056°.

Gautą reikšmę įrašius į (1.4.13) formulę galima gauti didžiausią deviaciją:

$$A+ B\cdot\sin(azimutas) + C\cdot\cos(azimutas)=1+ 3\cdot\sin 56° + 2\cdot\cos 56° = +4{,}6°.$$

JAR apribojimai. Pagal JAR reikalavimus, dideliuose orlaiviuose kompaso likutinės deviacijos lentelės, rodančios magnetinio kompaso (krypties indikatoriaus) kalibravimą tiesiame skrydyje ir veikiat varikliams, turi būti įrengtos prietaisuose arba šalia jų. Lentelės turi rodyti visas orlaivio magnetinių kursų, besiskiriančių ne daugiau kaip 45°, kalibravimo reikšmes. Be to, kompaso deviacija po kompensavimo procedūros tolydaus skrydžio metu negali viršyti 10°, esant bet kokiam skrydžio kursui.

Kompaso įrengimo vietą apibrėžia šie JAR reikalavimai:

– Atstumas tarp kompaso ir bet kurio kito prietaiso, turinčio savyje magnetinės medžiagos, turi būti toks, kad prietaiso dalys nesukeltų didesnės nei 1° deviacijos arba panašių prietaisų visuma nesukeltų didesnės nei 2° deviacijos. Tos pačios taisyklės galioja ir įmontuotiems elektriniams prietaisams bei jų elektros laidų instaliacijai, kai įjungiama sistema.
– Bet kokie orlaivio vairų ar važiuoklės judesiai neturi lemti didesnės nei 1° deviacijos.
– Bet koks orlaivių ilgalaikio ar trumpalaikio magnetizmo, apibūdinamų koeficientais *B* ir *C*, suminis poveikis su minkštosios geležies dedamosiomis neturi viršyti:

Koeficientas	Tiesioginio nuskaitymo kompasas (laipsniais)	Nuotolinio nuskaitymo kompasas (laipsniais)
B	15	5
C	15	5

Pastaba:

a) Po korekcijos didžiausia bet kurio kurso deviacija tiesioginio nuskaitymo kompasui neturi būti didesnė nei 3°, o nuotolinio nuskaitymo kompasui – 1°.

b) Avariniai ir neprivalomieji kompasai gali nevisiškai atitikti JAR reikalavimus, tačiau juos privaloma tinkamai įrengti.

Kompaso svyravimai. Tai speciali kompaso kalibravimo procedūra, kurios metu nustatomas kietosios ir minkštosios geležies magnetizmo poveikio kompaso rodmenims dydis. Ši procedūra padeda nustatyti deviacijas, apskaičiuoti reikiamus koeficientus ir palengvina deviacijų kompensavimą. Kompaso svyravimai vykdomi:

– perėmus iš gamintojų naują orlaivį;
– įrengus naują kompasą;
– periodiškai kas 3 mėn.;
– vykdant pagrindines apžiūras;
– pasikeitus orlaivyje magnetinėms medžiagoms;
– kai orlaivis nuolatos arba neilgam periodui perkeliamas į kitą oro uostą, įskaitant ir žymų magnetinės platumos pasikeitimą;
– po žaibo smūgio į orlaivį arba užsitęsusio skrydžio statinėmis sąlygomis;
– jei orlaivis išstovėjo nukreiptas viena kryptimi daugiau nei 4 savaites;
– kai nuolatos vežami geležiniai (magnetiniai) kroviniai;
– visuomet pagal aptarnavimo grafiką;
– išduodant JAR sertifikatą;
– bet kada, kai kyla abejonių dėl kompaso afišoje įrašytų kompaso arba liktinių deviacijų.

Kompaso svyravimo procedūra. Yra daugybė kompaso svyravimų atlikimo metodų, tačiau dažniausiai tai atlieka inžinierius su tam tikrų parametrų kompasu, pritvirtintu ant trikojo. Specializuotas kompasas įtvirtinamas orlaivio priekyje arba už jo, vienoje linijoje su orlaivio išilgine ašimi. Dažniausiai tik patyręs kompaso reguliuotojas vykdo šią procedūrą, kurią galima suskirstyti į du etapus. Korekcija ir svyravimo tikrinimas atliekami taip:

– įsitikinama, kad kompasas yra tinkamas naudoti;
– iš orlaivio pašalinami visi skrydžio metu nenaudojami prietaisai;
– įsitikinama, kad visi skrydžio metu naudojami prietaisai tinkamai įrengti;
– orlaivis perstatomas į svyravimo procedūros atlikimo vietą (ne mažiau kaip 50 m nuo kito orlaivio ir 100 m nuo angaro);
– įsitikinama, kad vairai yra normalaus skrydžio padėtyse, varikliai užvesti, o radijo ir elektros prietaisai įjungti;
– orlaivis pasukamas kursu į Pietus (M) ir užrašoma deviacija (t. y. skirtumas tarp specializuotojo kompaso ir orlaivio kompaso rodmenų);
– orlaivis pasukamas kursu į Vakarus (M) ir užrašoma deviacija;
– orlaivis pasukamas kursu į Šiaurę (M) ir užrašoma deviacija. Apskaičiuotas koeficientas *C* pritaikomas kompaso rodmenims;
– į mikroreguliatoriaus bloką įstatomas kompaso koregavimo raktas, kuris sukamas, kol kompaso rodyklė pradeda rodyti pakoreguotus rodmenis. Raktas ištraukiamas;
– orlaivis pasukamas kursu į Rytus (M) ir užrašoma deviacija. Apskaičiuojamas koeficientas *B* ir analogiškai koeficientui *C* įvykdoma jo korekcija;
– korekciniai svyravimai baigti;
– svyravimai atliekami aštuonių kursų kryptimis, pradedant Pietryčių kursu (M), ir kiekvienam kursui užrašoma deviacija;
– pabaigus svyravimus, apskaičiuojamas kompaso rodmenims pritaikomas koeficientas *A*. Atlaisvinamas kompaso korpusas arba korpuso laikantieji varžtai netiesioginio nuskaitymo kompasuose, ir prietaisas sukamas tol, kol kompaso rodyklė neparodo teisingo kurso. Įtvirtinami ir priveržiami varžtai;
– svyravimų procedūros metu nustatytoms deviacijoms algebriškai pritaikomas koeficientas *A*, deviacijos sužymimos ir pasirūpinama, kad kompaso deviacijų lentelė būtų orlaivyje.

Kompaso svyravimo procedūros pavyzdys. Žemiau pateikiami rodmenys, gauti tipiškos svyravimo procedūros metu:

Korekciniai svyravimai

	Specializuotojo kompaso kursas (M) (laipsniais)	**Orlaivio kompaso kursas (C) (laipsniais)**	**Deviacija (laipsniais)**	
S	182	180	+2	
W	274	270	+4	
N	000	354	+6	
		$koeficientas\,C = \frac{+6-(+2)}{2} = +2$		Pasukti kompasą kursu 356°
E	090	090	0	
		$koeficientas\,B = \frac{0-(+4)}{2} = -2$		Pasukti kompasą kursu 088°

Svyravimo tikrinimas

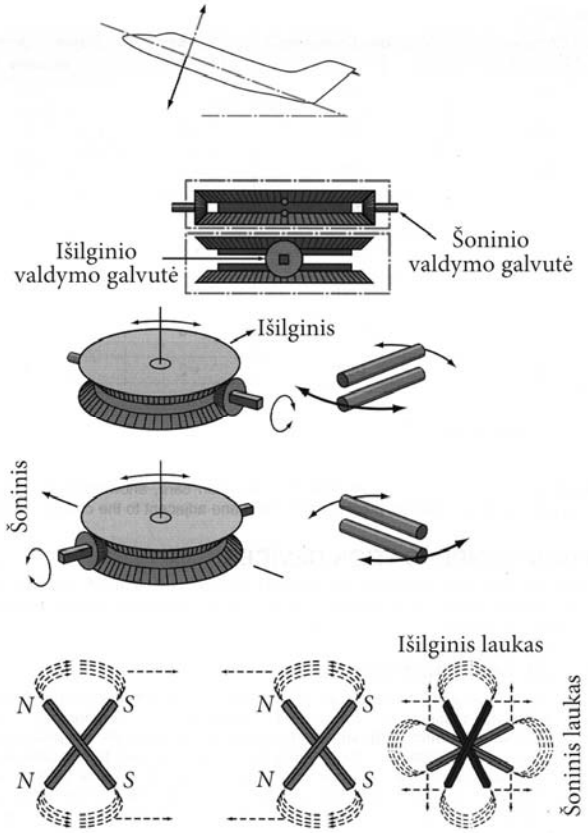
Specializuotojo kompaso kursas (M) (laipsniais)	Orlaivio kompaso kursas (C) (laipsniais)	Deviacija (laipsniais)	Likutinė deviacija pagal „A“
136	131	+5	+2
183	181	+2	–1
225	221	+4	+1
270	268	+2	–1
313	308	+5	+2
000	358	+2	–1
047	044	+3	0
092	090	+2	–1

$$koeficientas\, A = \frac{25}{8} = +3.$$

Gauti rodmenys padeda sudaryti magnetinių kursų likutinių deviacijų lentelę, kuri yra orlaivyje šalia kompaso.

Deviacijų kompensavimo prietaisai. Kompaso svyravimo procedūros metu gauti koeficientai *C*, *B* ir *A* naudojami kompaso rodyklės korekcijai arba balansavimui tam tikru dydžiu, atitinkančiu esamą deviaciją. Visa tai realizuojama pasitelkiant tokius metodus:

– **Mechaninė kompensacija.** Dauguma šitų prietaisų sudaryti iš dviejų porų magnetų, kurie įtvirtinti nuožulniųjų krumpliaračių montaže, pagamintame iš nemagnetinių medžiagų. Jie įdėti vienas virš kito, kaip parodyta 1.4.44 pav. Tai mikroreguliatorius, užtikrinantis, kad, magnetams esant neutraliojoje pozicijoje, viena magnetų pora, būdama lygiagreti orlaivio išilginei ašiai, kompensuoja bet kokias koeficiento C korekcijas. Tuo metu kita magnetų pora, būdama statmena pirmajai, kompensuoja bet kokias koeficiento B korekcijas. Panaudojant kompaso korekcijos raktą galima reguliuoti nuožulniųjų krumpliaračių pasisukimą.



1.4.44 pav. Kompaso deviacijų mechaninė kompensacija pastoviais koregavimo magnetais

Magnetų pora pajuda iš savo neutraliosios pozicijos, kaip parodyta paveiksle, ir pakoreguoja magneto rodyklės rodmenis pagal koeficientą B arba C priklausomai nuo to, kuri magnetų pora reguliuojama.

– **Elektroninė kompensacija.** Elektroninės kompensacijos prietaisai naudojami netiesioginio nuskaitymo kompasuose ir yra sudaryti iš dviejų prie srauto detektoriaus bloko ritės prijungtų reguliuojamųjų potenciometrų. Šie potenciometrai reaguoja į mechaninio kompensatoriaus koeficientų *B* ir *C* magnetus, kuriuos kalibravimo metu pajudinus, potenciometrai tiekia nuolatinės srovės signalus į magnetinio srauto daviklio rites. Tiekiamų signalų sukeltas magnetinis laukas yra pakankamai stiprus, kad atsvertų deviacijas ir per sinchroninio perdavimo jungtį pakoreguotų krypties magneto – indukcinio daviklio išėjimo signalą. Šis savo ruožtu pasuka giroskopą, ir kurso rodytuvas pateikia pakoreguotus rodmenis.

1.5. Radijo aukščiamatis

Radijo aukščiamatis (RA) yra įrenginys, tiksliai matuojantis atstumą nuo Žemės paviršiaus iki orlaivio, skrendančio iki 2500 pėdų aukštyje. Kaip žinoma, tikrasis *QNH,* standartinis *QNE* ir santykinis orlaivio skrydžio aukščiai matuojami barometriniais prietaisais. Tačiau šie prietaisai matuoja aukštį pagal orlaivį supančio oro slėgį, todėl jų paklaidos siekia kelias dešimtis metrų, ir jie negali būti naudojami orlaivį tiksliai tupdant pagal prietaisus. Orlaiviui skrendant žemai, o ypač tupiant, naudojami tikslesni, radiolokacijos principu veikiantys aukščiamačiai, matuojantys absoliutųjį *QFE* skrydžio aukštį iki Žemės paviršiaus, kalnų, pastatų ir kitų objektų Žemės ir vandens paviršiuje. Ši informacija tiekiama į:

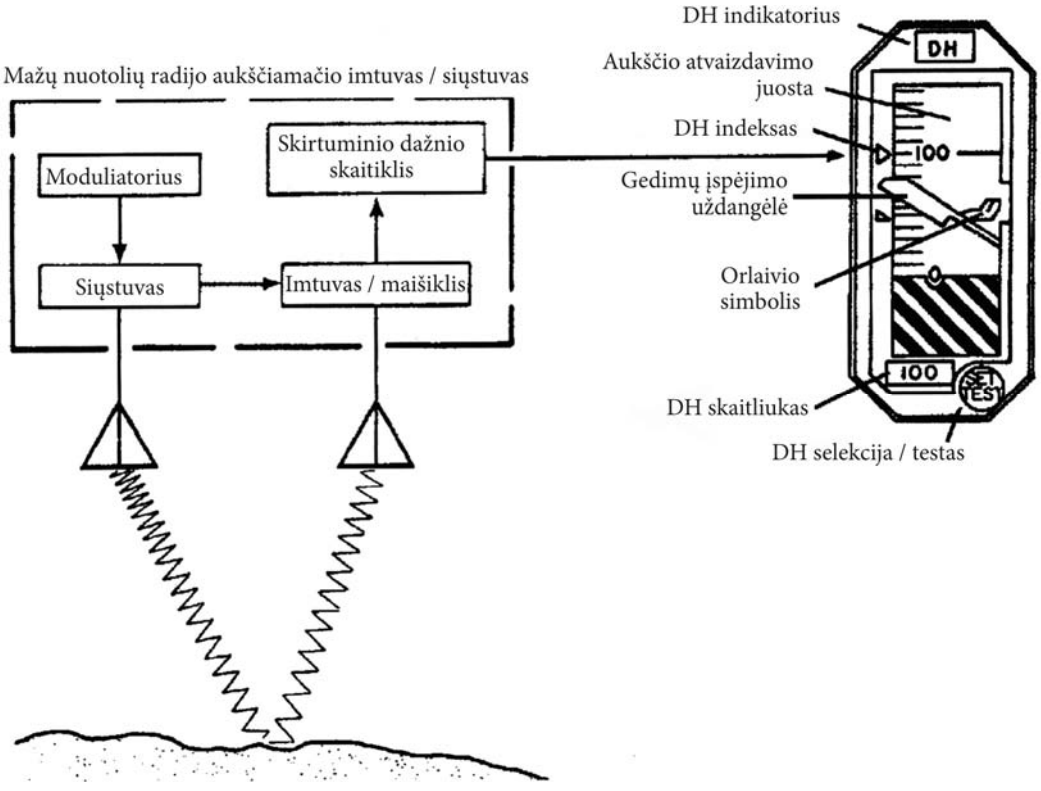
– automatinio skrydžio valdymo sistemą AFCS;

– žemės artumo įspėjimo sistemą GPWS.

Radijo aukščiamačio matavimai per duomenų liniją perduodami į elektroninę skrydžių prietasų sistemą (EFIS) ir skrydžio valdymo kompiuterį (FMC).

1.5.1. Radijo aukščiamačio sandara

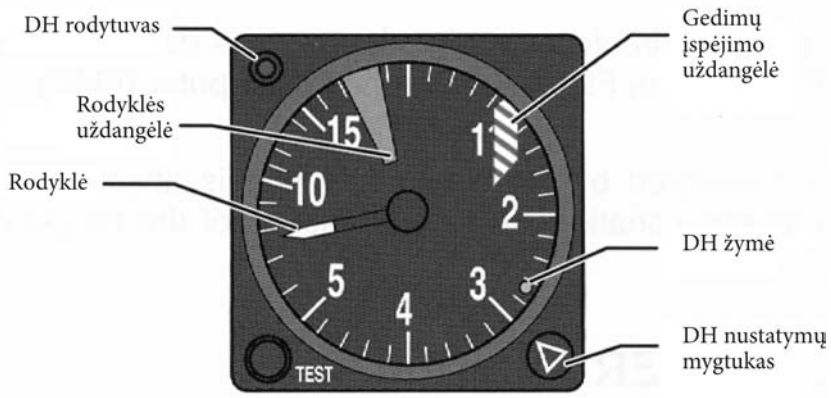
Aukščiamatį sudaro (1.5.1 pav.) imtuvas / siųstuvas su dažnio moduliatoriumi, integruotuoju laiko matuokliu arba skirtuminio dažnio skaitikliu, radijo siųstuvu bei imtuvu ir vaizduoklis.



1.5.1 pav. Radijo aukščiamačio struktūra

Radijo aukščiamačio matavimo diapazonas yra nuo nulio (Žemės paviršiaus) iki 500–700 m (nuo 0 iki 2500 pėdų) aukščio.

Rodmenys atvaizduojami mechaniniame žiediniame rodytuve su vertikaliąja skale (1.5.1 pav.) arba elektroniniame kabinos prietaise, kurio skalė apskrita ir netolyginė. Iki 500 pėdų skalės padalos išdėstytos tiesiškai, kad būtų galima tiksliau rodyti nedidelius aukščius, o toliau iki 2500 pėdų skalė logaritminė (1.5.2 pav.).



1.5.2 pav. Elektroninis radijo aukščiamačio vaizduoklis

Pilotai rankenėle kabinos prietaise gali nustatyti signalizuojamojo aukščio reikšmę 100 pėdų (30 m) tikslumu, dažniausiai tai būna apsisprendimo tūpti aukštis DH. Susilyginus prietaiso aukščio rodyklei su nustatyta reikšme, šalia rankenėlės užsidega lemputė ir kabinoje girdimas panašus į sireną garsas.

Vaizduoklio viršuje „OFF“ arba „FAIL“ gedimų uždangėlė atsiranda, jei yra:

– maitinimo gedimas;

– per silpnas atspindėtas signalas;

– vietiniai atspindžiai nuo orlaivio konstrukcijų trukdo matavimams.

Aukščio rodyklė slepiama po uždangėle, jei:

– prietaisas išjungtas;

– yra gedimų radijo signalo siuntimo kanale;

– matuojamas aukštis viršija 2500 pėdų.

Radijo aukščiamatis – autonominis prietaisas. Orlaivio techniniame skyriuje yra jo imtuvo ir siųstuvo blokas, siunčiamoji ir priimamoji antenos (abi vienodos konstrukcijos) yra sklandmens apačioje, o kabinoje – rodmenų atvaizdavimo prietaisas.

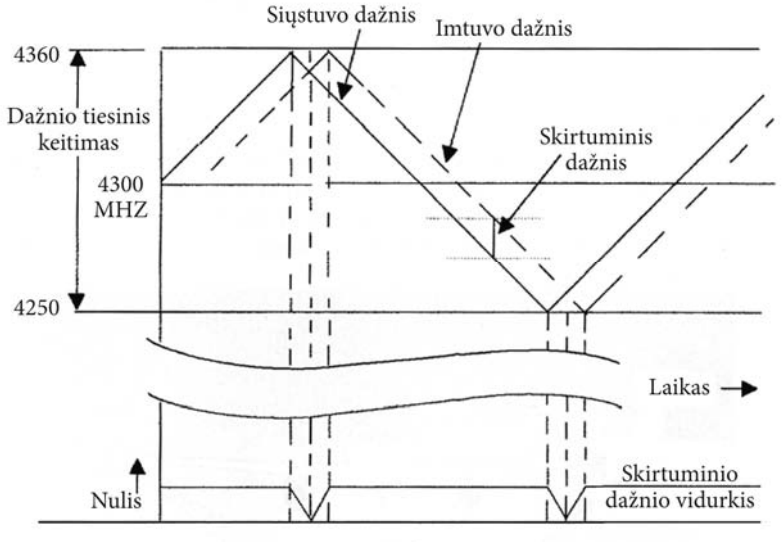
1.5.2. Radijo aukščiamačio veikimo principas

Radijo aukščiamačio veikimo principas pagrįstas elektromagnetinių bangų sklidimo savybėmis aplinkoje, tai – sklidimo greičio pastovumas ir tiesinė sklidimo trajektorija. Aukščiui matuoti gali būti taikomi du metodai – laikinis ir dažninis. Mažų nuotolių radijo aukščiamatyje naudojamas dažninis nuotolio matavimo metodas.

Radijo aukščiamačio (1.5.1 pav.) siųstuvo antena spinduliuoja Žemės paviršiaus link nukreiptą radijo virpesių signalą, kurio dažnis yra maždaug 4300 MHz ir imtuvo antena priima nuo Žemės atsispindėjusį signalą. Išspinduliuojamas signalas nepertraukiamai siunčiamas į Žemę, tuo pat metu jo dažnis tolygiai keičiasi nuo mažiausios iki didžiausios reikšmės. Kuo aukščiau skrenda orlaivis, tuo ilgesnį kelią H praeina išsiųstas signalas nuo siųstuvo antenos iki Žemės ir atgal iki imtuvo antenos, tuo daugiau laiko praeina, kol atsispindėjusi nuo Žemės paviršiaus signalo dalis pasiekia priimamąją anteną. Šis laikas $T_H = 2\mathrm{H}/c$, čia c – radijo signalo sklidimo greitis. Per tą laiką siunčiamojo signalo dažnis spėja pasikeisti. Perdavus dalį siunčiamojo signalo į imtuvą, galima palyginti priimtojo ir tuo metu siunčiamojo signalų dažnius ir pagal jų skirtumą nustatyti orlaivio aukštį, nes dažnis keičiasi tolygiai laikui. Kai siunčiamojo signalo daž-

nis pasiekia didžiausią reikšmę, jis pradedamas tolygiai mažinti iki mažiausiosios, ir aukštis matuojamas toliau.

Radijo aukščiamačio imtuvo / siųstuvo bloke yra moduliatorius. Tai žemojo dažnio generatorius, formuojantis simetrinio pjūklo pavidalo įtampa U_M, kurios pasikartojimo dažnis F_M = 150 Hz. Šia įtampa moduliatorius moduliuoja siųstuvo aukštojo dažnio generatorių (žr. epiūras 1.5.3 pav,), tolygiai keisdamas jo dažnį nuo vidutinės reikšmės 4300 MHz į abi puses, dažnio deviacija $\Delta = \pm 50$ MHz.



1.5.3 pav. Radijo aukščiamačio veikimą paaiškinančios epiūros

Siųstuvo antena spinduliuoja signalą Žemės link, o atsispindėjusį signalą priima imtuvo antena. Iš jos signalas, kurio dažnis f_2, patenka į maišiklį, į kurį tiesiogiai tiekiamas tuo metu spinduliuojamas signalas, kurio dažnis f_1 jau yra kitas. Maišiklyje išskiriamas signalo dažnis F_H lygus dažnių f_1 ir f_2 skirtumui. Šis signalas sustiprinamas ir siunčiamas į skirtuminio dažnio skaitiklį. Jame gaunama įtampa U_H yra proporcinga aukščiui. Ji tiekiama į kabinos prietaisą ir kitas sistemas.

Keičiantis aukščiamačio dažnio kitimo ženklui, gali atsirasti matavimo paklaida, tačiau, kai signalo sklidimo trukmė T_H daug kartų mažesnė už signalo moduliacijos periodą $T_M (T_M = 1/F_M)$, paklaida dėl dažnio keitimosi yra labai maža. Tada vietoje aukščiui proporcingo dažnio F_H matuojamas vidutinis dažnis $F_V = F_H(1-2T_H/T_M)$.

Imtuvas ir siųstuvas turi savikontrolės schemą, kuri įjungiama nuspaudus mygtuką jo korpuso priekyje. Dažniausiai 6 lemputės šalia mygtuko savikontrolės metu parodo aukščiamačio gedimus, pvz., sumažėjus imtuvo jautriui, užsidega lemputė SENS; esant antenos gedimui, užsidega ANTENNA ir pan. Kai kurie aukščiamačiai turi kitą savikontrolės mygtuką kabinos prietaise. Jį nuspaudus, prietaiso rodyklė rodo signalizuojamojo aukščio reikšmę.

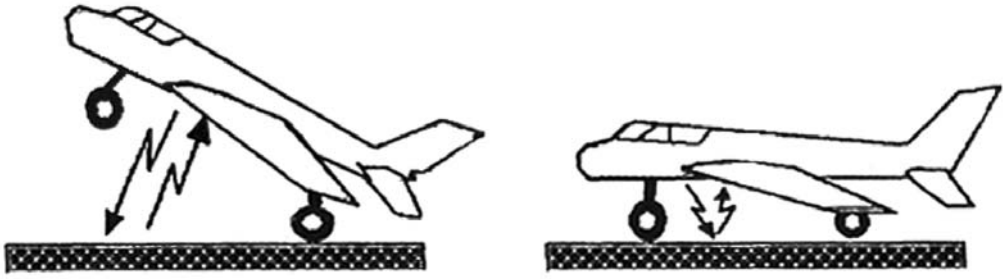
Naujesniuose orlaiviuose atskiras aukščio rodiklis kabinoje retai naudojamas, aukštis rodomas informacinės sistemos EFIS vaizduokliuose EADI ar ERSI. EFIS valdymo pulte galima nustatyti signalizuojamojo aukščio DH reikšmę.

1.5.3. Radijo aukščiamačio tikslumas ir paklaidos

Montuojant radijo aukščiamačius orlaivyje, turi būti fiksuotas jo blokų išdėstymas ir bendraašių (koaksialinių) jungiamųjų kabelių ilgis, nes gali pasikeisti signalų sklidimo kelias ir dėl to atsirasti aukščio paklaida. Orlaiviuose aukščiamačiai periodiškai derinami naudojant kontrolės aparatūrą. Derinant reikia atsižvelgti į tai, kad aukščiamatis turi rodyti nulinį aukštį orlaiviui tupiant, kada jo pagrindinė važiuoklė paliečia KTI paviršių, o priekinė važiuoklė dar yra pakilusi (1.5.4 pav.).

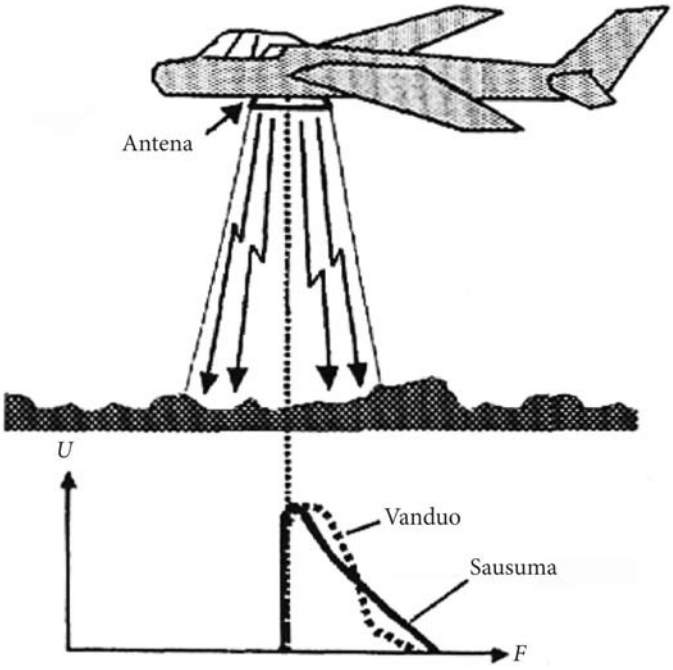
Tada signalo kelias nuo siunčiamosios iki priimamosios antenos yra didesnis negu orlaiviui stovint aikštelėje, ypač jei orlaivis didelis, o antenos yra arti priekinės važiuoklės. Praktiškai aikštelėje stovinčiame orlaivyje aukščiamatis rodo nedidelį neigiamą aukštį.

Radijo aukščiamačio tikslumą lemia keletas veiksnių. Minėta, kad aukščiamatis matuoja vidutinį skirtuminį dažnį F_V. Dėl to rodomas mažesnis aukštis, aukščio paklaidą galima rasti pagal minėtąją formulę. Didelę įtaką turi Žemės paviršiaus nelygumai ar skrydis virš tankaus miško. Kai paviršiaus nelygumai greitai keičiasi, aukščiamačio rodyklė nespėja į juos reaguoti ir rodo vidutinį aukštį. Kadangi KTI paviršius yra lygus, tupiant paklaidos dėl paviršiaus nelygumo nėra.



1.5.4 pav. Signalo kelio skirtumas orlaiviui tupiant ir stovint

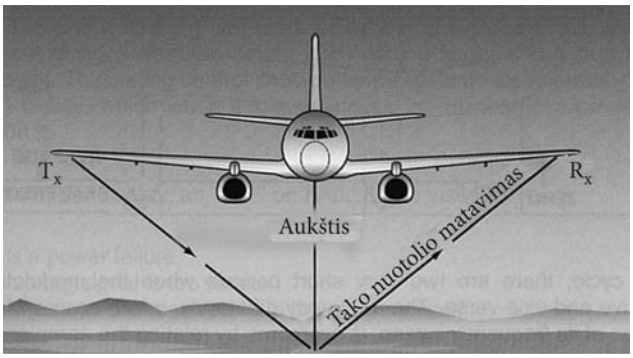
Paklaidų taip pat atsiranda dėl to, kad signalas atsispindi nuo didelio Žemės paviršiaus ploto, nes iš siunčiamosios antenos jis sklinda plačiu spinduliu (1.5.5 pav.). Atsispindėjusios signalo dalys sklinda skirtingais keliais. Priimamojoje antenoje gaunamas vidutinį dažnį turintis signalo spektras. Šis vidutinis dažnis gali būti įvertintas derinant aukščiamatį, bet tik tuo atveju, jei Žemės paviršius lygus. Kintant paviršiaus aukščiui dėl nelygumų ar jo savybėms (pvz., skrendant virš sausumos ir vandens), signalo spektro vidutinis dažnis keičiasi ir šio pasikeitimo negalima įvertinti.



1.5.5 pav. Atsispindėjusio signalo spektras

Priklausomai nuo siųstuvo T_X ir imtuvo T_Y antenų išdėstymo ant orlaivio sklandmens tarpusavio nuotolio atsiranda papildomos aukščiamačio paklaidos:

– kada siųstuvo ir imtuvo antenos sumontuotos orlaivyje per arti viena nuo kitos, atsiranda tiesioginio spinduliuojamo signalo prasiskverbimo į imtuvą efektas, sukeliantis siunčiamo ir atspindėto signalų parazitinę interferenciją ir dėl jos atsirandančias matavimų paklaidas;
– kada antenos pernelyg toli viena nuo kitos, esant mažiems aukščiams, susidaro signalų sklidimo nuotolio geometrinė paklaida, kaip tai matyti iš 1.5.6 pav.



1.5.6 pav. Nuotolio matavimo geometrinės paklaidos susidarymas

Nepaisant to, radijo aukščiamatis yra tiksliausias iš visų orlaivio aukščio matavimo priemonių. Arti Žemės jo paklaida neviršija ±0,5 m.

2. SKRYDŽIO VALDYMO SISTEMOS

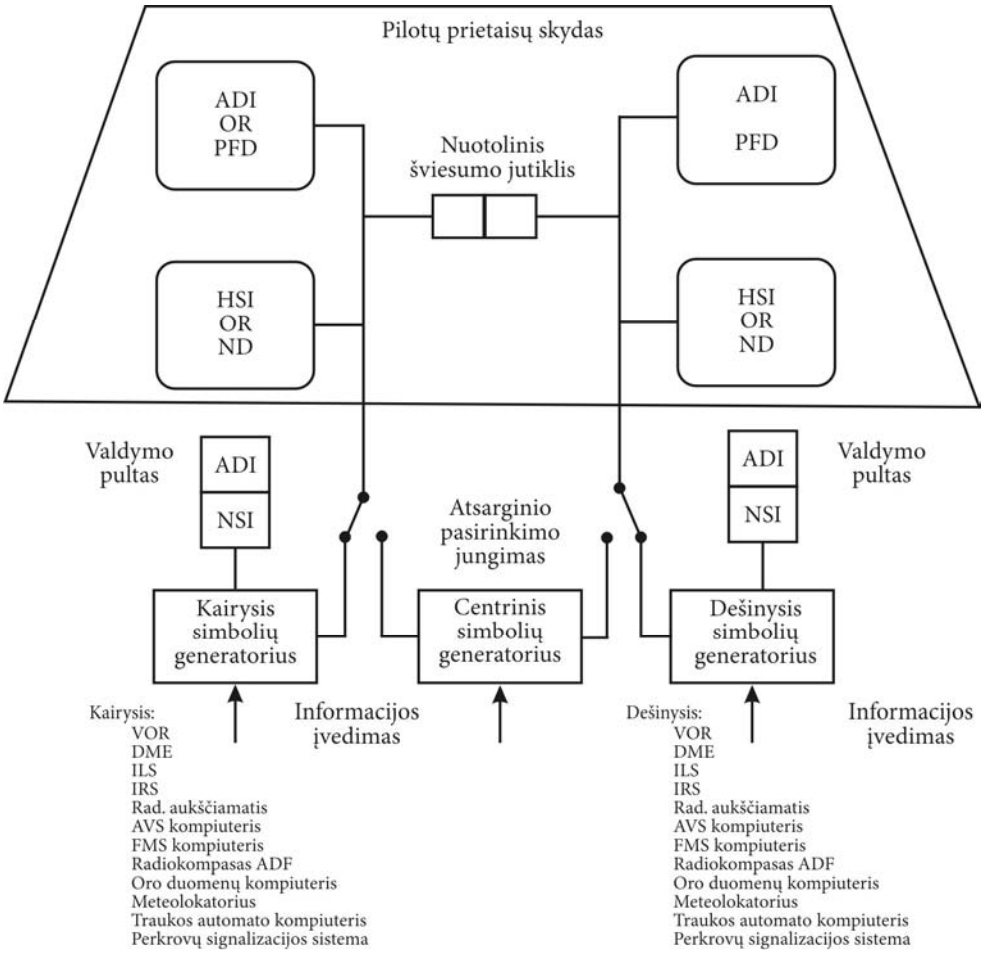
2.1. Elektroninė skrydžio prietaisų sistema

2.1.1. Paskirtis

Elektroninė skrydžio prietaisų sistema (EFIS) yra pakankamai sudėtinga skrydžio valdymo sistema (FDS), kurioje orlaivio padėčiai ir navigacinei informacijai tiekti naudojami elektroniniai ir plazminiai vaizduokliai bei šviesos diodų įrenginiai. Ši sistema keičia elektromechaninius prietaisus ir aprūpina labai patikimais duomenimis, reikalingais norint saugiai valdyti orlaivį. Šioje sistemoje visa informacija sujungiama ir pateikiama pilotui vizualiai stebėti patogioje orlaivio kabinos vietoje. Aiškiais spalviniais simboliais pristatyta informacija yra lengvai suprantama. Aktualios informacijos pasirinkimas aiškus, nereikalaujantis viso ekrano peržiūros.

2.1.2. EFIS architektūra

2.1.1 pav. pateikta bazinė EFIS struktūros schema:



2.1.1 pav. EFIS architektūra

Sistema sudaryta iš dviejų vienodų aparatūros komplektų, iš kurių kiekvienas turi:
– simbolių generatorių (SG);
– valdymo pultą (VP);
– vaizduoklių ryškumo valdymo elementą (RVE);
– pirminį skrydžių vaizduoklį (PFD);
– navigacijos vaizduoklį (ND).

Dažnai sistemoje naudojamas trečiasis, atsarginis, simbolių generatorius. Visi EFIS funkciniai moduliai susieti tarpusavyje ir su pirminiais informacijos davikliais per skaitmenines duomenų perdavimo magistrales.

2.1.3. Simbolių generatorius

Tai pagrindinis sistemos EFIS modulis. Jis atlieka pagrindines centrinio sistemos EFIS procesoriaus funkcijas:

– per duomenų magistrales nuskaito kitų orlaivio prietaisų ir sistemų formuojamus orlaivio valdymo ir navigacijos parametrų signalus;
– grupuoja ir apdoroja informacinius signalus;
– formuoja tam tikrus vaizdinės (semantinės) informacijos įvaizdžius (elektroninius simbolius);
– perduoda juos atvaizduoti į vaizduoklius;
– reguliariai realiu laiko masteliu atnaujina vaizduokliais teikiamą informaciją.

Dvivietėse kabinose kiekvienas pilotas turi atskirus PFD ir HD vaizduoklius, kurie yra prieš juos prietaisų lentoje. Pilotams tiekiama informacija skirstoma pagal vaizduoklius į navigacinę ir valdymo. Paprastai HD vaizduoklyje pateikiama navigacinė informacija, o PFD vaizduoklyje – valdymo. Kadangi vaizduokliai techniškai yra identiški informacijos vaizdavimas prireikus gali būti keičiamas.

Vaizduokliuose rodomas vaizdas ir simboliai pateikiami 6-omis spalvomis:

– ***balta*** spalva žymima iš kitų sistemų gaunama navigacijos ir orlaivio valdymo informacija;
– ***žalia*** spalva žymima iš kitų sistemų gaunama mažiau svarbi informacija, jeigu ją reika atskirti nuo baltos;
– ***šviesiai raudona (purpurinio atspalvio)*** spalva žymima skrydžiui reikalinga informacija (skrydžio kelio linija, nuokrypų linijos bei rodyklės ir pan.), gaunama iš automatinės skrydžių valdymo ir komandinės skrydžių sistemų;
– ***žydrą*** foną turi viršutinė PFD vaizduoklio erdvę žyminčios polinkio skalės dalis ir duomenys, kurie bus reikalingi skrendant kitomis kelio linijomis;
– ***geltoną*** foną turi apatinė PFD vaizduoklio Žemę žyminčios polinkio skalės dalis ir didesnio dėmesio reikalaujanti informacija, pranešimai apie nenormalų navigacijos priemonių veikimą;
– ***raudona*** spalva žymima avarinė informacija ir iš meteorologinio radijo lokatoriaus gaunamų pavojingiausių meteorologinių darinių lokalizacijos vaizdai.

2.1.4. Pirminis skrydžių vaizduoklis (PFD)

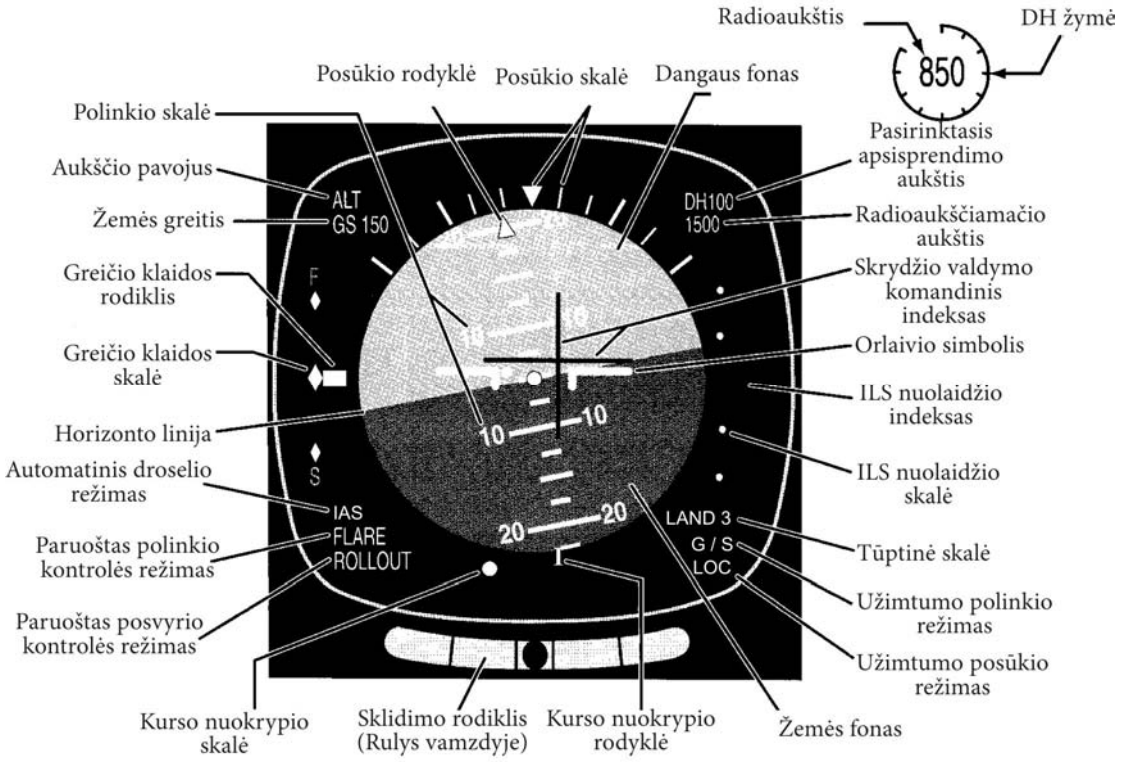
Pagal vaizduojamos informacijos pobūdį pirminis skrydžių vaizduoklis (*Primary flight display, PFD*) dar vadinamas orlaivio padėties erdvėje rodikliu ir, priklausomai nuo techninio išpildymo, žymimas: ADI arba EADI (2.1.2 pav.).

Vaizduoklyje orlaivio polinkį rodo laipsniais sužymėta vertikaliai slenkanti skalė nejudamos orlaivio simbolio pavidalo rodyklės atžvilgiu (2.1.2 pav.). Polinkio skalė gali slinkti aukštyn ir žemyn, o atsiradus orlaivio posvyriui, pasisukti į kairę ar dešinę pusę, nurodydama posvyrio kampą laipsniais. Polinkio skalės fonas, kuriame rodomos teigiamosios polinkio reikšmės, yra žydros spalvos, o kuriame neigiamosios – geltonos (arba rudos, juodos) spalvos. Nejudanti orlaivio simbolio rodyklė yra pateikiamo vaizdo centre.

Vaizduoklis valdomas iš sistemos valdymo pulto. Jame yra vaizdo ryškumo nustatymo ir automatinio palaikymo priemonės, galimybė nustatyti apsisprendimo aukštį DH, jį stebėti bei įjungti ar išjungti signalizaciją.

Vaizduoklis gali veikti komandiniu ir automatiniu režimais: pirmuoju atveju vaizduoklyje pateikiama informacija, reikalinga pilotams optimaliai orlaivio padėčiai valdyti; antruoju, kai orlaivį valdo automatinio skrydžio valdymo sistema, vaizduoklyje atspindima valdymo eiga. Komandiniam režimui aprūpinti vaizduoklyje numatyti komandiniai purpurinio atspalvio apverstos V raidės pavidalo indeksai. Orlaivio valdymo metu, priklausomai nuo reikiamų valdymo procedūrų, generuojamų komandine valdymo sistema FMC, šie indeksai gali keisti savo padėtį ir vietą nejudamosios orlaivio simbolio pavidalo rodyklės at-

žvilgiu. Tokiu būdu nurodoma, kokius valdymo veiksmus turi atlikti pilotas. Keičiant orlaivio polinkį ir posvyrį, pilotas sutapdina V indeksus su vaizduoklio ekrano centre esančia orlaivio simbolio rodykle.



2.1.2 pav. Pirminis elektroninis skrydžių vaizduoklis

PFD yra pagrindinis prietaisas, kuriame pateikiama orlaivio nuokrypa nuo tūptinės pagal inercinės sistemos ILS signalus. Nuokrypa rodoma taškais sužymėtose krypties ir nuolydžio skalėse. Nuolydžio skalė yra ekrano dešinėje, nuokrypą rodo purpurinis trapecijos formos indeksas. Krypties skalė yra ekrano apačioje. Purpurinis trapecijos formos indeksas rodo ne tik nuokrypos kairėn ar dešinėn dydį, bet, artėdamas prie KTT, kyla aukštyn, artėdamas prie orlaivio simbolio rodyklės. Kai aukštis iki Žemės, matuojamas radijo aukščiamačiu, yra didesnis nei 60 m, trapecijos pavidalo indeksas nusileidžia į prietaiso ekrano apačią.

PFD vaizduoklyje taip pat rodoma informacija apie indikatorinį ir kelio greitį, greitį Macho skaičiais, didžiausią leistinąjį ir mažiausią orlaiviui valdyti reikalingą greitį, orlaivio automatinio valdymo sistemų režimus, tam tikrus skrydžio ir apsisprendimo aukščius bei kitą reikiamą informaciją.

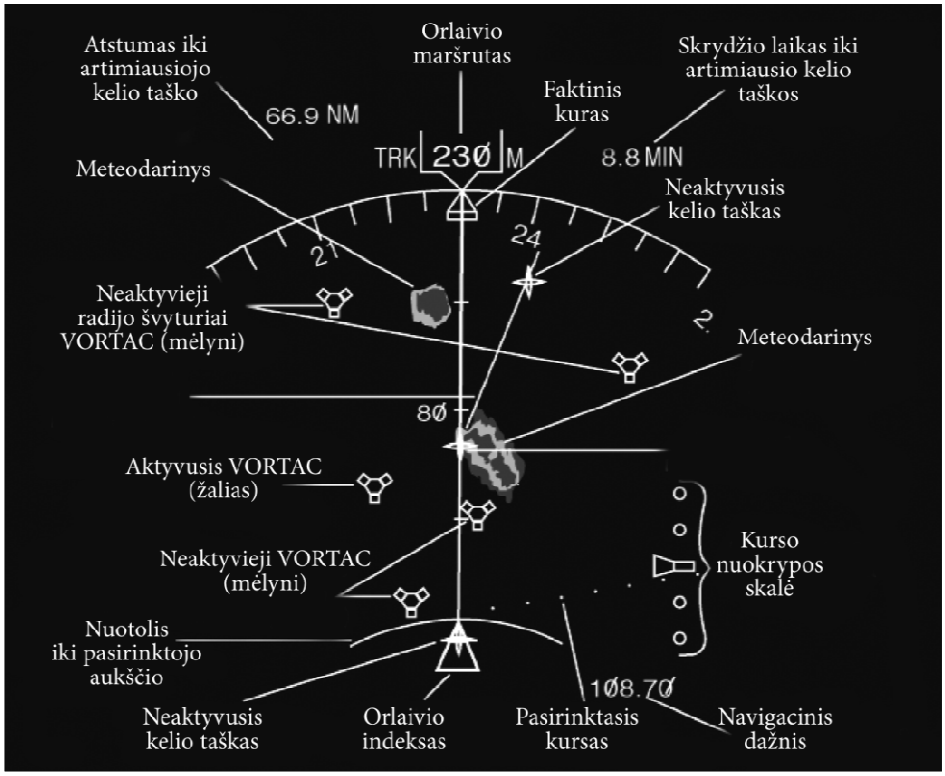
2.1.5. Navigacijos vaizduoklis (ND)

Navigacijos vaizduoklis (*Navigation Display*, *ND*) dar vadinamas horizontaliosios padėties rodikliu, „Boeing“ orlaivių dokumentuose žymimas HSI arba EHSI, skirtas rodyti orlaivio skrydžio krypčiai Žemės paviršiaus atžvilgiu ir jos pokyčiams skrydžio metu. Paprastai pilotų kabinoje yra du navigacijos vaizduokliai, po vieną kiekvienam pilotui (2.1.3 pav.).

Visų navigacinių vaizduoklių ekranų viršutinėje dalyje rodomas orlaivio magnetinis kursas, kurį nustato magnetinės ar inercinės sistemos. Yra du informacijos vaizdavimo režimai: pilnasis (FULL) ir dalinis (EXP). Režimu FULL vaizduoklio ekrane pateikiama pilna azimuto 360° skalė, o režimu EXP – jos dalis viršutinėje ekrano dalyje (2.1.3 pav.). Vaizduoklis gali rodyti visakrypčio švyturio VOR azimutą laipsniais skalėje iš penkių atskaitos taškų ir NDB švyturio santykinį azimutą. Veikiant FULL režimu, ND ekrano centre yra nejudamasis nedidelis trikampio pavidalo orlaivio indeksas, pagal kurį lengviau orientuotis horizontaliojoje plokštumoje.

Veikiant EXP režimu, šis indeksas yra ekrano apačioje. Kurso rodyklė rodo pasirinktąjį kursą laipsniais, o prietaiso viršutinėje dalyje, kairiajame kampe esančiame langelyje, matomas atstumas jūrmylėmis iki antžeminės DME stoties. Rodoma nuokrypa nuo pasirinktojo kelio. Vaizduoklyje taip pat rodomas

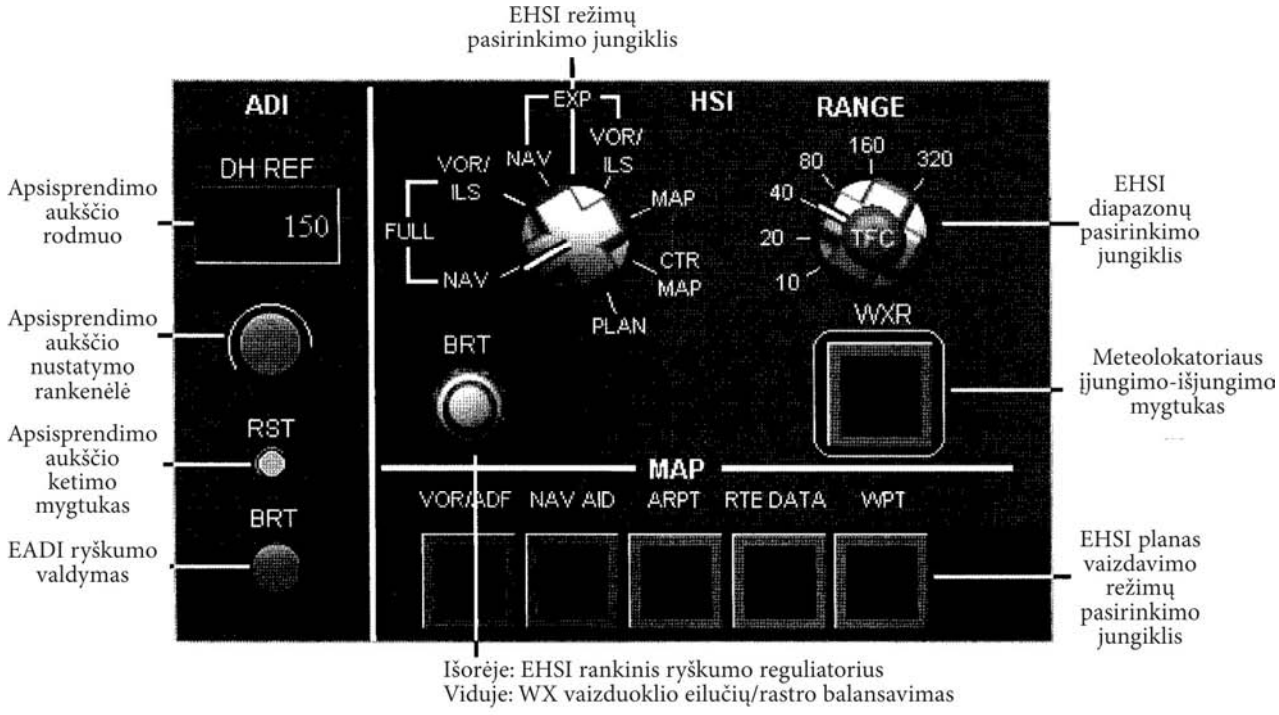
orlaivio tikrasis orinis greitis ir kiti, iš simbolių generatoriaus gaunami duomenys. Jei kuri nors iš duomenų formavimo sistemų neveikia, vaizduoklyje atitinkamoje ekrano vietoje atsiranda apie tai perspėjanti geltonos spalvos uždangėlė.



2.1.3 pav. Elektroninis navigacijos vaizduoklis

2.1.6. Valdymo pultas

ESI valdymo pultas yra skirtas navigacijos vaizduoklio režimams valdyti (2.1.4 pav.).



2.1.4 pav. ESI valdymo pulto bendrasis vaizdas

Jame numatyti šie valdymo režimai su tam tikromis funkcijomis:
– RANGE – meteorologinio radiolokatoriaus ar rodomo skrydžio maršruto mastelio nustatymo rankenėlė;
– veikimo režimų: FULL NAV, FULL VOR/ILS6 EXP NAV6 EXP VOR/ILS, MAP, CRT MAP, PLAN nustatymo rankenėlė;
– vaizdo ryškumo valdymo rankenėlė BRT, valdanti EADI ir EHSI vaizduoklių ryškumą;
– nuspaudus meteorologinio radiolokatoriaus įjungimo mygtuką WRX, vaizduoklio EHSI ekrane rodomas skrydžio erdvės meteorologinis vaizdas šiais režimais: MAP, CTR MAP, EXP VOR/ILS, EXP NAV;
– Grupė mygtukų MAP – tai duomenų apie skrydžio maršrutą atvaizdavimo mygtukai:
  - VOR/ADF – vaizduojami VOR azimutai ir ADF pelengai, MAP ir CTRMAP režimais;
  - NAV AID – vaizduojami VOR, VORTAC ir kitų navigacijos priemonių duomenys;
  - APRT – vaizduojami oro uostų duomenys;
  - RTE DATA – vaizduojami kelio taškus apibūdinantys duomenys ir atvykimo į juos laikas;
  - WPT – vaizduojami kelio taškų, neįvestų į skrydžio programą, duomenys.

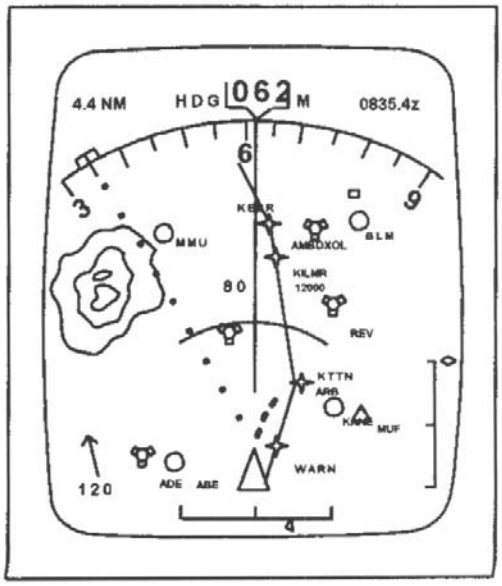
2.1.7. Taikymo pavyzdžiai

EHSI vaizduoja informaciją, kurią pasirenka pilotas, nustatydamas valdymo pulte veikimo režimą.

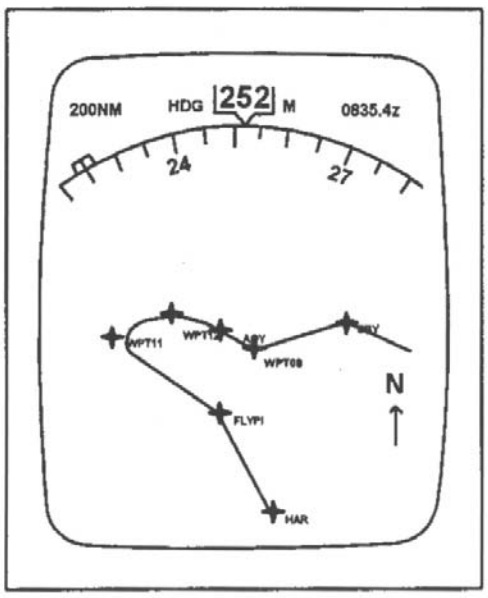
Veikimo režimas NAV taikomas tada, kai reikia stebėti informaciją apie skrydį, tiekiant vaizduojamus duomenis iš skrydžio valdymo sistemos kompiuterio. Vaizduoklyje EHSI tokiu atveju parodoma orlaivio vieta artimiausio skrydžio kelio taško atžvilgiu ir duomenys apie orlaivio skrydžio trajektoriją horizontalioje plokštumoje. Gali būti rodoma visa 360° kurso skalė (FULL NAV) arba ±35° jos dalis pasirinktojo kelio atžvilgiu (EXP NAV).

Veikiant MAP režimu, vaizduojamas judantis orlaivio maršrutas su kelio atkarpomis ir taškais, antžeminiais navigaciniais švyturiais ir oro uostais (2.1.5 pav., a).

a)



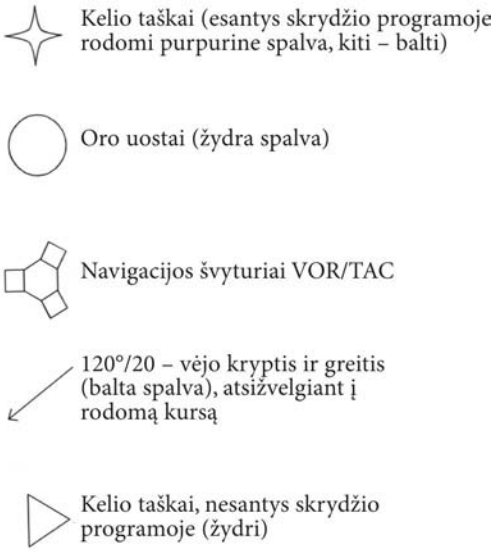
b)



2.1.5 pav. EHSI vaizdas: a – MAP ir b – PLAN režimais

Vaizdas slenka ir pasuka kartu su orlaiviu. MAP veikimo režimas taikomas norint matyti, kaip orlaivis skrenda pasirinktu maršrutu, kuris yra skrydžio valdymo sistemos FMS programoje. Orlaivio indeksas yra apačioje, todėl rodomas prieš orlaivį esantis maršruto vaizdas. EHSI viršuje rodoma magnetinio kurso skalės atkarpa ±35° į šalis nuo kelio linijos. Kurso duomenys gaunami iš inercinės sistemos IRS (kai orlaivis skrenda platumose per 70° laipsnių, rodomas tikrasis kursas). Veikiant šiuo režimu, gali būti rodomas meteorologinis vaizdas su nuotolio mastelio linijomis. Vaizduoklio apačioje, dešiniajame kampe, rombo pavidalo indeksas skalėje rodo nuokrypą. Kai orlaivis nukrypęs žemyn, rombas ir skaičius pasirodo skalės viršuje.

Standartiniais ženklais žymimos VOR, DME, kelio taškų, oro uostų ir kitos vietovės bei jų sutrumpinti pavadinimai:



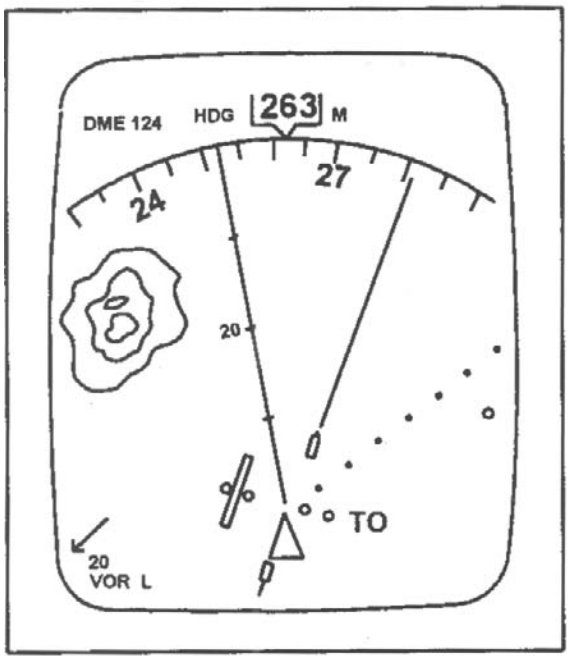
Navigacijos švyturių indeksai, kurių signalai priimami, yra žalios spalvos, kiti –žydros spalvos.

Veikiant CTR MAP režimu, orlaivio indeksas yra vaizduoklio centre ir rodoma visa 360° kurso skalė.

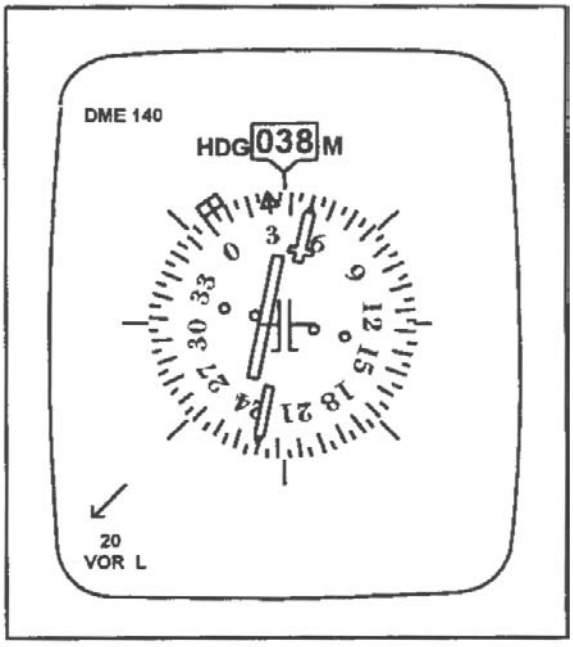
Įjungus PLAN režimą (2.1.5 pav., b), rodomas visas nejudamasis maršruto planas tikrosios (geografinės) Šiaurės atžvilgiu. Aktyvioji kelio linija (kuria skrendama) vaizduojama purpurine spalva. FMS pulto CDU klaviatūra galima pakeisti pasirinktą kelio liniją, ji bus rodoma ekrane. Pilotai gali ją pasirinkti ir tik tada naujus duomenis įvesti į FMS kompiuterį. Šis veikimo režimas dažniausiai taikomas prieš skrydį, sudarant skrydžio planą.

VOR/ILS veikimo režimas taikomas skrendant maršrutu, pasirinktuoju VOR radialu ir tupiant pagal ILS signalus. Vaizdas gali būti rodomas visas, su orlaivio indeksu ekrano centre ir 360° magnetinio kurso skale (veikimo režimas FULL VOR) (2.1.6 pav., b), arba su trikampio pavidalo orlaivio indeksu ekrano apačioje ir 70° kurso skalės priekine atkarpa (veikimo režimas EXP VOR) (2.1.6 pav., a). Abiem atvejais EHSI tada rodo nuokrypą nuo pasirinktojo VOR radialo (pasirinktosios kelio linijos). Purpurinės spalvos kelio linijos rodyklės vidurys tada pasislenka taškais sužymėtoje skalėje. Dar rodoma vėjo kryptis, greitis ir kiti duomenys.

a)



b)



2.1.6 pav. EHSI vaizdas VOR režimu

Panašiai atvaizduojama ILS informacija. Rodomą vaizdą galima papildyti meteorologinio lokatoriaus vaizdine informacija su nuotolio mastelio linijomis. Galima nustatyti nuorašą. Ji lygi kampui tarp magnetinio kurso (išilginės ašies) ir faktinės kelio linijos. 2.1.6 pav. magnetinis kursas lygus 263°, faktinės kelio linijos kampas yra 281°, todėl nuoraša lygi 18°.

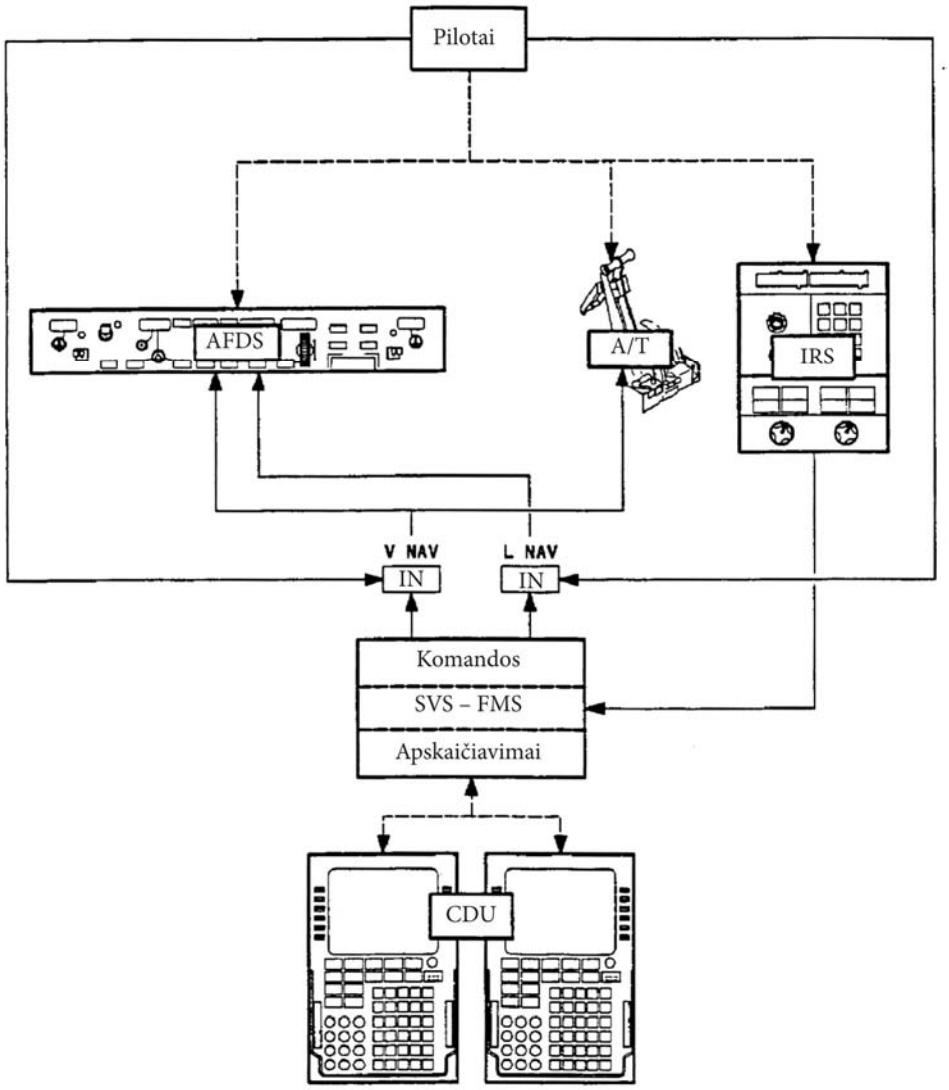
2.2. Skrydžio valdymo sistema (FMS)

2.2.1. Bendrieji principai

Skrydžio valdymo sistema FMS (*Flight Management System),* kurios struktūra pateikta 2.2.1 pav., jungia keturias pirmines sistemas:

1. Skrydžio valdymo kompiuterinę sistemą FMCS (*Flight Management Computer System*).
2. Autopiloto skrydžio valdymo sistemą AFDS (*Autopilot/Flight Director System*).
3. Traukos automatinio valdymo sistemą A/T (*Autothrottle*).
4. Inercinę nuorodų sistemą IRS (*Inertial Referente Sistem*).

Šios dedamosios yra visiškai nepriklausomos sistemos, ir bet kuri iš jų gali veikti individualiai ir įvairiais tarpusavio deriniais. Drauge šios dedamosios aprūpina nepertraukiamą automatinę aeronavigaciją, t. y. valdo orlaivio skrydį pagal pasirinktą programą automatiškai arba tiekiamomis įgulai komandomis.



2.2.1 pav. Skrydžio vadybos sistemos FMS struktūra

Svarbiausia FMS funkcija (skrydžio valdymas) numato automatizuotą orlaivio valdymo veiksmų vykdymą, navigacinę kontrolę ir automatinį skrydžio valdymą. Ši FMS funkcija realizuojama variklio galios valdymo sistemos PMS (*Power Management Control*) ir automatinio skrydžio valdymo sistemos AFCS (*Automatic Flight Control System*) sąveika. Tai leidžia dar labiau sumažinti orlaivio įgulos dalyvavimą skrydžio valdyme ir nepriklausomai veikti FMS sistemai. Ši sistema numato daugumos orlaivio valdymo operacijų automatizavimą, įgula atlieka tik bendrąją įrenginių veikimo kontrolę. Tokiu atveju skrydžiui vadovaujanti sistema FMS vykdo visas pagrindines automatinio valdymo funkcijas: automatiškai nustato orlaivio nuokrypas nuo pasirinktosios trajektorijos ir siunčia jų signalus į pirminių plokštumų bei variklių traukos valdymo įrenginius.

Šalutinė FMS funkcija – patariamoji, kai FMS tiekia duomenis komandiniam (*direktoriniam*) orlaivio valdymui. Šiuo atveju FMS kompiuteris nustato orlaivio vietos ir padėties erdvėje nuokrypas ir atvaizduoja jas kabinos vaizduokliuose. Pilotai valdo orlaivį kabinos vairais, stebėdami vaizduoklius (pagal juose rodomas orlaivio padėties nuokrypas nuo nustatyto skrydžio maršruto arba valdymo komandos).

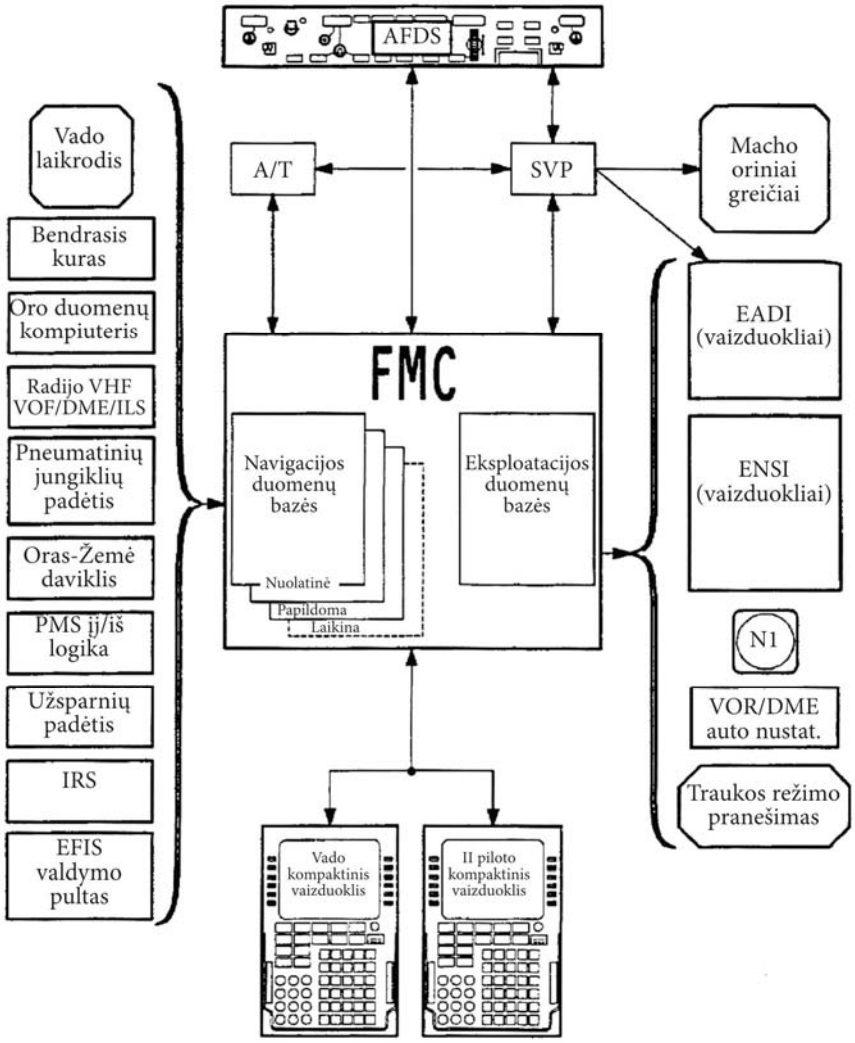
Orlaivio tipas ir jo dinaminiai rodikliai turi svarbiausią reikšmę visai sistemos sandarai. Šiuolaikinio orlaivio FMS yra sudėtinga sistema, susidedanti iš siauresnės paskirties posistemių ir atliekanti šias pagrindines funkcijas:

– skrydžio programos sudarymą;
– trajektorijos valdymą, automatiškai išvedant orlaivį į nurodytą kelio tašką, arba orlaivio valdymą, skrendant nurodytu greičiu pasirinktąja trajektorija;
– orlaivio padėties nuokrypų (klaidų) koregavimą viename ar keliuose pirminių plokštumų valdymo kanaluose;
– polinkio, posvyrio ir krypties stabilizaciją, kintant polinkiui ir posvyriui;
– kampinių orlaivio padėčių valdymą;
– orlaivio statinių ir dinaminių valdymo savybių gerinimą, valdant jį rankiniu, komandiniu ir automatiniu būdais;
– polinkio valdymą (balansavimą), kintant orlaivio masių centro padėčiai ir keliamajai jėgai;
– orlaivio išvedimą į horizontalųjį skrydį iš bet kokios padėties erdvėje;
– barometrinio skrydžio aukščio stabilizaciją;
– skrydžio greičio valdymą;
– automatinį orlaivio išvedimą aukštyn, patekus į pavojingai mažą aukštį, taip pat kylant į antrąjį ratą;
– automatišką arba komandinį orlaivio tupdymo valdymą iki apsisprendimo aukščio, kuris priklauso nuo aerodromo tūpimo sistemų kategorijos;
– valdymo komandų pateikimą vaizduokliuose EADI ir EHSI, kartu su orlaivio sistemų veikimo duomenimis;
– navigacijos ir variklių valdymo duomenų apdorojimą, palengvinant pilotų darbą;
– automatinę sistemos savikontrolę prieš skrydį ir skrendant.

FMS veikimo tikslumas yra pakankamai didelis: polinkio palaikymo tikslumas neviršija 0,5°, posvyrio ir kurso – iki 1°, aukščio – kelių dešimčių metrų.

2.2.2. Skrydžio valdymo kompiuterinė sistema

Norint automatiškai skristi pasirinktąja trajektorija, reikia prieš skrydį sudaryti skrydžio programą ir turėti įrenginius, kurie tą programą vykdo. Pasikeitus aplinkybėms skrendant, programa turi būti pakeista. Programuojamas orlaivio skrydis nuo pakilimo iki tūpimo reikalauja daugelio atskirų orlaivio navigacijos ir valdymo priemonių sujungimo į vieną didelę bendrąją sistemą. Tokia sistema turi nustatyti orlaivio vietą ir padėtį erdvėje, palyginti gautus duomenis su skrydžio programa, išmatuoti esamas nuokrypas ir joms proporcingus signalus siųsti orlaivio valdymo plokštumoms.



2.2.2 pav. Skrydžio valdymo kompiuterinės sistemos architektūra

Skrydžio valdymo kompiuterinė sistema FMCS yra modernių orlaivių elektroninių sistemų centras ir informacijos kaupiklis iš atskirų posistemių (2.2.2 pav.). Orlaivis kartu su FMCS tapo bendra valdymo sistema, kurioje orlaivis yra valdymo objektas, FMCS – vykdytojas, o pilotas valdymo stebėtojas.

Be to, FMCS suteikia įgulai galimybę valdyti skrydžio trajektorijos horizontaliąją L-NAV ir vertikaliąją V-NAV dedamąsias per valdymo vaizduoklio CDU (*Comand Dispay Unit*) klaviatūrą. Skaičiavimai horizontalės navigacijai jungia tokius duomenis, kaip reikamos skrydžio kryptys, greičiai ir skrydžio maršruto atstumai. Atvirkščiai, skaičiavimai vertikalės navigacijai jungia tokius duomenis, kaip sunaudojamo kuro kiekiai, optimalūs greičiai ir rekomenduojami aukščiai. Kai operuojama pagal reikamą skrydžio laiką iki maršruto tikslo (režimas RTA), apskaičiavimai jungia reikamus greičius, kilimo laikus ir skrydžio maršruto optimizavimo duomenis.

FMCS gali nustatyti orlaivio vietą, padėtį erdvėje ir vykdyti skrydžio programą, todėl jai tiekiami įvairių orlaivio navigacijos priemonių duomenys (2.2.2 pav.) Svarbiausios iš jų yra inercinės ir radionavigacinės sistemos. Pilotai orlaivio valdymą stebi kabinos prietaisuose, kur kartu rodomi į skrydžio programą įkelti (pasirinktieji) ir iš navigacijos priemonių gauti (faktiniai) duomenys. Šiuos duomenis pilotas gali palyginti ir pats nustatyti esamas nuokrypas.

Sistema gali automatiškai atlikti daugelį kitų su orlaivio navigacija susijusių pilotų veiksmų: nustatytu laiku perjungti radijo ryšio ir radijo navigacijos priemonių dažnius, ties tarpiniais kelio taškais tiksliai pasukti orlaivį kitu kursu, daugiau veiksmų atlikti automatiškai orlaiviui tupiant ir t. t. Turėdamas nuotolinio valdymo galimybes pilotas bet kuriuo metu gali įsiterpti į FMCS valdymą ar jį išjungti, kai jis to nori

arba kai sugenda FMCS. Kad pilotas galėtų suspėti perimti valdymą, sugedus FMCS, avariniai saugos automatai ją išjungia ir išveda orlaivį į horizontalųjį skrydį.

Vykdantieji FMCS mechanizmai, – tai elektrinės-hidraulinės arba elektrinės jėgos pavaros, valdančios orlaivio plokštumas. Į jas tiekiami valdymo nuokrypų (klaidų) korekcijos signalai. Keičiant valdymo plokštumų padėtį ir variklio trauką, automatiškai likviduojamos orlaivio nuokrypos nuo pasirinktosios trajektorijos ir reikiamo skrydžio greičio.

2.2.3. Valdymo vaizduoklis

Valdymo vaizduoklis CDU (*Command Display Unit*), kurio bendrasis vaizdas pateiktas 2.2.3 pav., skirtas sudaryti ryšiui tarp orlaivio ekipažo ir skrydžių valdymo kompiuterio. Viršutinėje vaizduoklio dalyje yra raidinis/skaitmeninis skystųjų kristalų ekranas, apatinėje dalyje išdėstyta klaviatūra. Pilotai, naudodamiesi vaizduoklio klaviatūra, gali įvesti į skrydžio valdymo kompiuterį pasirinktus horizontaliosios ir vertikaliosios navigacijos skrydžio plano duomenis.

2.2.3 pav. raidėmis pažymėtos vaizduoklio dalys turi šias funkcijas:

A – eilutės pasirinkimo klavišai

6 skirtingi atvaizdavimo kanalai. Paspaudžiami norint pasirinkti arba įrašyti duomenis gretimoje ekrano eilutėje.

B – CDU ekranas

Vaizduojamas duomenų puslapis, pasirinktas pagal funkciją, režimą arba eilutės klavišą.

C – puslapio pavadinimas

Žymi duomenų tipą. Kai horizontaliosios ar vertikaliosios navigacijos režimuose, atvaizduojami užrašai ACR arba MOD, tai reiškia puslapio padėtį.

D – puslapio numeris

Pirmasis skaičius nurodo puslapio numerį, antrasis – susijusių puslapių skaičių.

E – dėžutės

Atvaizduoja duomenis, reikalingus FMS navigacijos galimybėms patenkinti. Duomenis įrašyti iš bloknoto (juodraščiui), naudojant **A – eilutės pasirinkimo klavišus**.

F – brūkšneliai

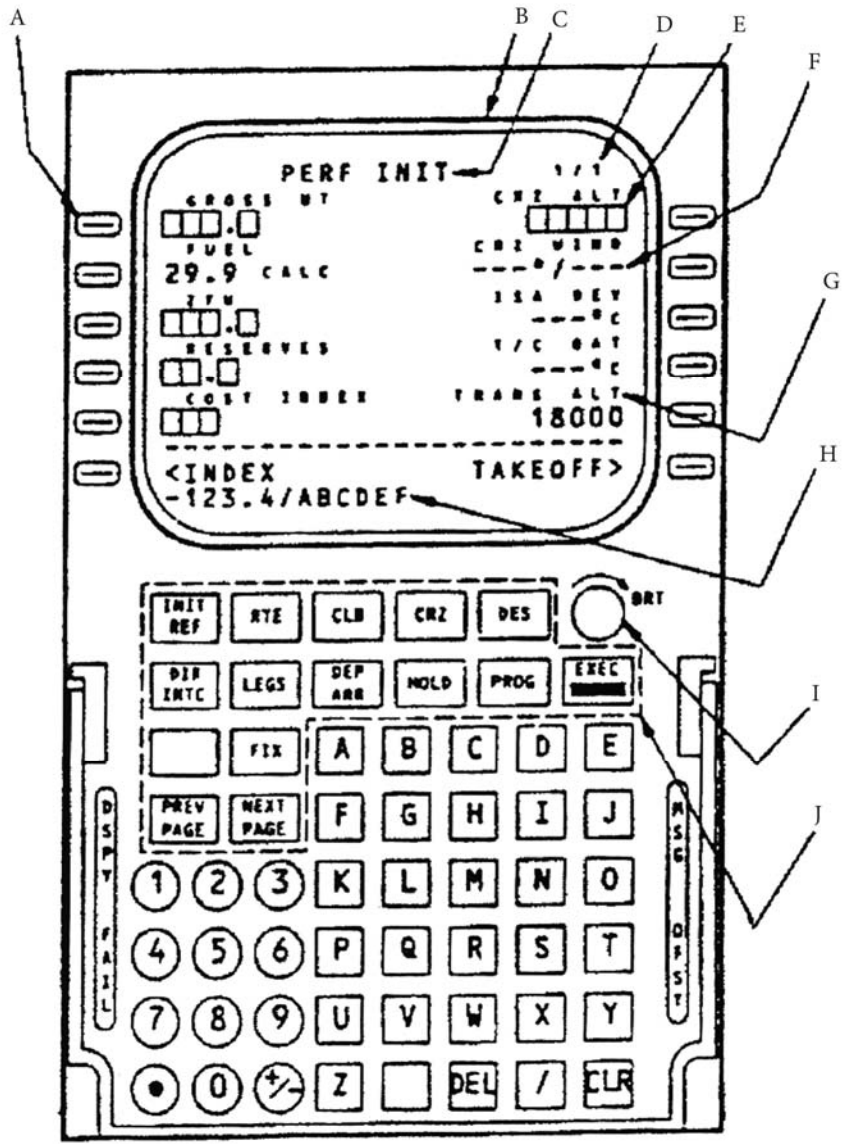
Nurodo, kad sistemai reikalingi įvadiniai duomenys. Klavišu duomenys perkeliami iš bloknoto (juodraščiui), naudojant **A – eilutės pasirinkimo klavišus**.

G – eilutės pavadinimas

Nurodo duomenų tipą eilutėje. Kai FMS neatpažįsta duomenų, pavadinimas dingsta.

H – bloknoto (juodraščiui) eilutė

Tai apatinė vaizduoklio ekrane eilutė, rodanti:
– sistemos generuojamus pranešimus įgulai;
– visus klaviatūros įrašus (prieš perkėlimą į reikalingą eilutę);
– duomenis, perkeliamus iš vienos eilutės į kitą.



2.2.3 pav. Valdymo vaizduoklio CDU pultas

2.2.4. Valdymo pultai

Integruotoje sistemoje yra du papildomi valdymo pultai:

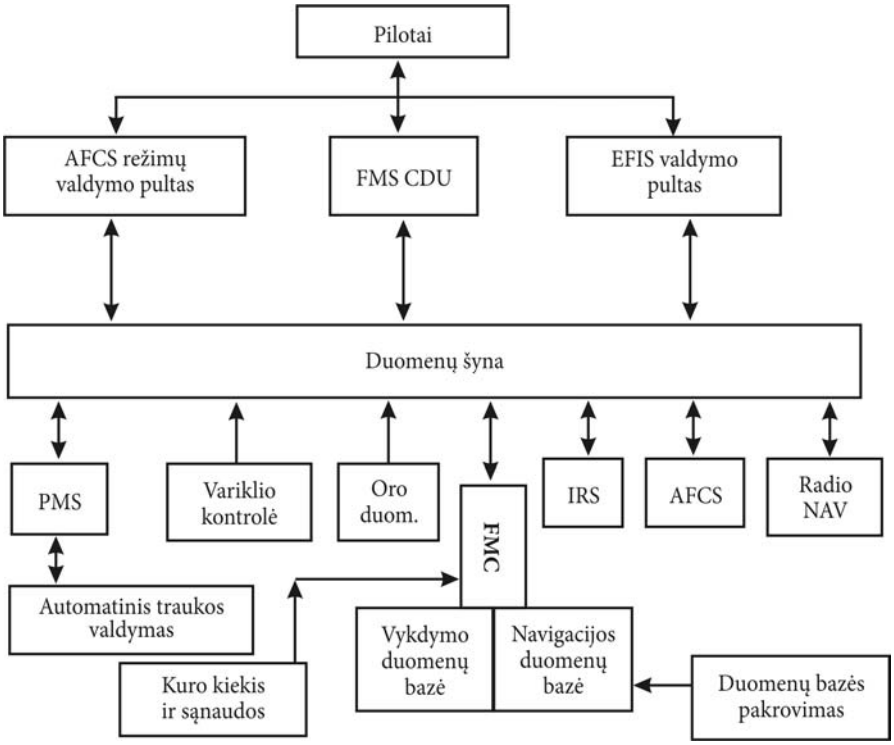
– AFCS režimų valdymo pultas MPC (*Mode Control Panel*);

– EFIS valdymo pultas ECP (*EFIS Control Panel*).

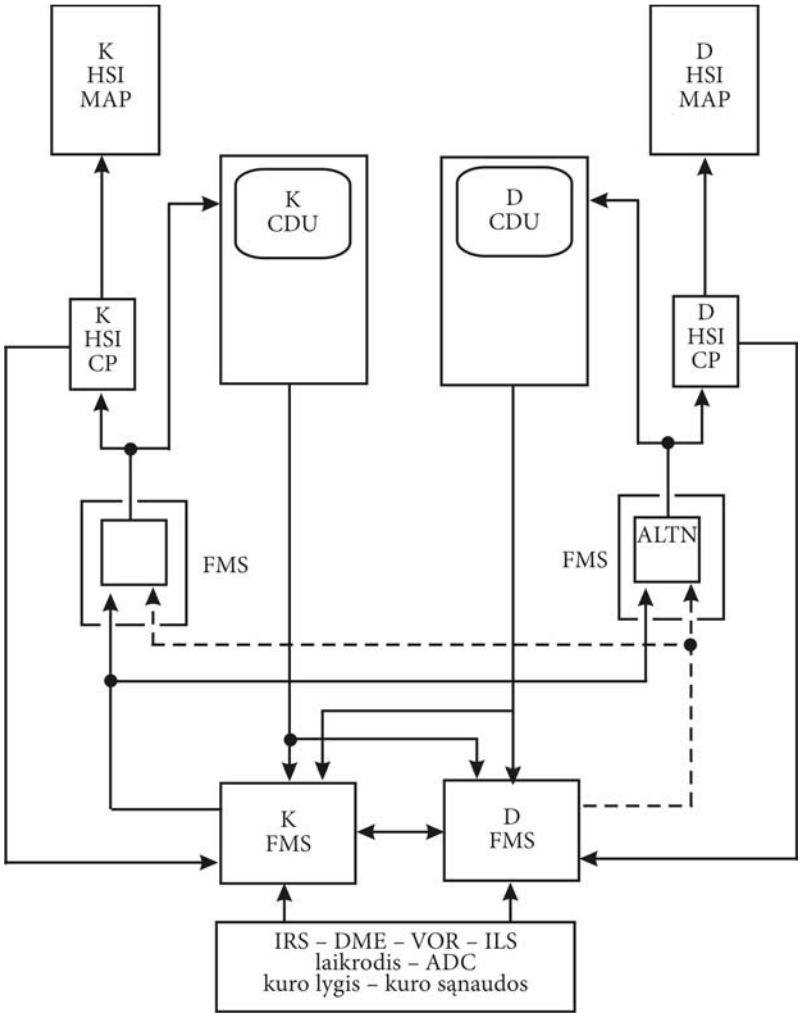
2.2.4 pav. pateiktoje schemoje parodytas informacijos srautų judėjimas tarp įvairių FMS dedamųjų.

Daugumoje modernių orlaivių montuojami du FMS vienetai, kurie paprastai įrengiami, kaip parodyta 2.2.5 pav. Abi sistemos kryžmai susiejamos kaip sudvejinta sistema, todėl duomenys, įvesti į vieną iš CDU, automatiškai patenka į abi FMS. Taigi tikslinga įvedinėti duomenis į vieną iš CDU, o kitą taikyti kryžminiam įvestų duomenų patikrinimui (2.2.5 pav.).

Jeigu FMS jungiklis yra ALTN padėtyje, tai susiję CDU ir EFIS vaizduokliai sujungti su kitu kompiuteriu. Šis tarpusavio ryšio lygis leidžia palaikyti (aptarnauti) visus vaizduoklius, jei veikia nors vienas CDU ir viena FMS.



2.2.4 pav. Informacijos srautų judėjimas skrydžių valdymo sistemoje



2.2.5 pav. Sudvejintų FMS panaudojimo schema

2.2.5. CDU ir FMS terminologija

Aktyvus (ACTIVE)

Tai nurodymas dabar naudoti skrydžio plano duomenis horizontaliosios L-NAV ir vertikaliosios V-NAV navigacinėms komandoms nustatyti. Pavyzdžiui, aktyvuojama kryptis link būsimojo skrydžio maršruto taško, kurio navigaciją šiuo metu sistema turi nustatyti: V-NAV režimo vykdymas bus kilimas, kruizinis skrydis arba nusileidimo skrydžio greičio kitimo grafikas, panaudojamas tuo pat metu orlaivio polinkio ir traukos valdymo komandoms generuoti, kurios rodomos veiksmų ACT susietų puslapių pavadinimais.

Aktyvavimas (ACTIVATE)

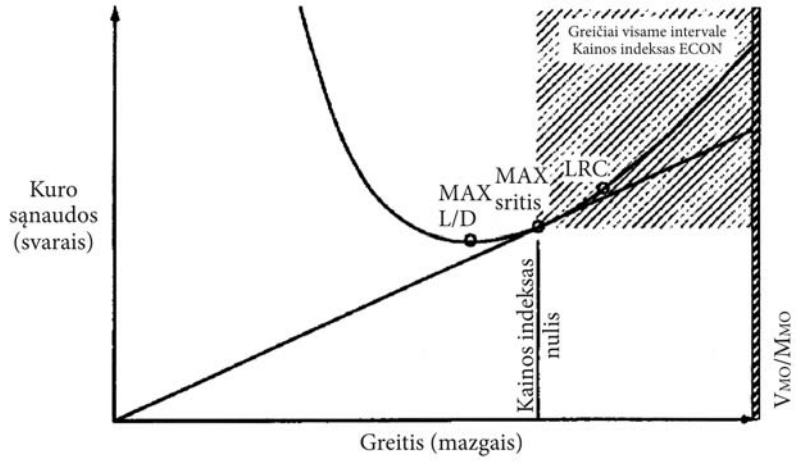
Tai nurodymas aktyvuoti vieno ar dviejų skrydžio maršrutų trasas ir dviejų pakopų realizavimo procesą. Pirmuoju klavišo ACTIVATE paspaudimu aktyvuojasi norimo maršruto duomenų įrašymo eilučių pasirinkimo klavišai o antrą kartą paspaudus aktyvuojasi klavišo EXCES (perteklius) pašvietimas.

Barometrinio aukščio apribojimas (ALTITUDE)

Tai nurodymas iš abiejų pusių apriboti pasirinktojo kelio taškų aukščius.

Kainos indeksas (COST INDEX)

Tai operatoriaus nurodomas kainos lygis, panaudojamas tendencingam greičių plano grafikui nustatyti. Jis pagrįstas samprotavimo būdu, pasiekiamu optimaliu balansu tarp mažiausio kuro kiekio ir mažiausio skrydžio laiko nustatytu skrydžio maršrutu. Kainos indeksas priklauso nuo santykio tarp orlaivio eksploatacijos ir kuro sąnaudų (pavyzdžiui, jei kuro sąnaudos didelės, tai šis indeksas mažas). Kainos indeksas lygus nuliui, kai orlaivis skrenda rentabiliu ECON greičiu (t. y. orlaivis skrenda maksimalaus greičio ribose) ir aukščiausias kainos indeksas tampa, kai orlaivio greičių santykis (V_{M_o}/M_{M_o}) artėja prie vieneto. Jei kainos indeksas nustatytas, tai vienareikšmiškai leidžia apskaičiuoti reikiamus kilimo, kruizinio skrydžio ir tūpimo etapų greičius (2.2.6 pav.).



2.2.6 pav. Kainos indekso nustatymas

Rentabilus (ECON)

Tai nurodymas orlaivio skrydžiui rentabiliu greičiu, apskaičiuotu mažinant jį pagal kuro sąnaudų kainos indekso reikšmę. Rentabilaus (ekonominio) greičio reikšmė įvedama į FMC/CDU prieš skrydį.

Įrašyti (ENTER)

Tai nurodymas reikiamiems duomenims įvesti per CDU klaviatūrą arba pagal CDU eilučių pasirinkimo selektoriaus klavišą.

Ištrinti (ERASE)

Tai nurodymas panaikinti panaudotus duomenis iš sistemos, atliekamas eilučių pasirinkimo selektoriaus klavišu, esančiu šalia žodžio ERASE.

Vykdyti (EXECUTE)

Nurodo vykdyti aktyvų skrydžio planą pagal jau įvestus duomenis, nuspaudus šviečiantį klavišą EXEC.

Neveikiantis (INACTIVE)

Nurodo, kad šiuo metu nėra reikiamų trasos, kilimo, kruizo ar tūpimo pirminių duomenų, naudojamų L-NAV arba V-NAV komandoms nustatyti.

Inicijuoti (INITIALISE)

Nukreipia į būtinos sistemos funkcionavimo, duomenų įvedimo į CDU procesus.

Pranešimas (MESAGE)

Nurodo informaciją, kurią sistema automatiškai rašo juodraščio bloknoto eilutėje, kad praneštų pilotams tam tikras skrydžio sąlygas.

Pakeisti (MODIFIED)

Nurodo pakeisti aktyvius duomenis. Keičiant aktyvuotą maršruto trasą ar valdymo režimą, režimų ženklas MOD nurodo susietų puslapių pavadinimą. Nurodymas ištrinti ERASE taip pat atsiranda šalia vieno iš duomenų eilutės pasirinkimo klavišo, EXEC klavišas šviečia. Paspaudus ERASE eilutės pasirinkimo klavišą, pažymimi keičiami duomenys, o paspaudus klavišą EXEC, pakeisti duomenys aktyvuojami.

Raginti (PROMPT)

Nurodo į ką nors, vaizduojamą CDU, skirtą padėti pilotams vykdyti užduotį. Dėžutės ar brūkšneliai primena įgulai įvesti informaciją į susietas eilutes arba žodžiais kitaip nurodoma, kokie paskui turi būti veiksmai.

Resinchronizavimas (RESYNCHRONISATION)

Tai automatinis procesas vieno FMS duomenų perdavimo kitam, kai aptinkamas reikšmingas skirtumas tarp dviejų FMC sistemų veikimo.

Pasirinkti (SELEC)

Nurodo nuspausti klavišą, kad pasirinktų nustatytus duomenis ar veiksmą.

Greičio ribojimas (SPEED RESTRICTION)

Tai nurodymas keisti pilotams reikamam skrydžio aukščiui nustatytą orinio greičio ribą.

Greičio perėjimas (TRANSITION)

Nurodymas pereiti prie automatiškai nustatytos orinio greičio ribos, atitinkančios skrydžio aukštį.

Kelio punktas (WAYPOINT)

Nurodymai apie pasirinkto maršruto punktą. Tai gali būti punktas, nurodomas platumos ir ilgumos duomenimis, gaunamais iš stoties VOR arba navigacijos duomenų bazės NDB, avialinijų susikirtimo vietoje ir t. t. arba sąlyginė riba. Pavyzdžiui, sąlyginė riba, pasiekus 1000 pėdų (300 m) aukštį.

2.2.6. Skrydžio valdymo kompiuterio atmintis

FMS atmintį sudaro trys atminties tipai:

– ***Operatyvioji programų įrašymo ir trynimo atmintis***, tiktai skaitoma atmintis (EPROM) arba (*Burble Memory*). Joje kaupiami navigaciniai ir atvaizdavimo duomenys;

– ***Pastovioji laisvojo priėjimo atmintis*** (NV RAM). Joje kaupiami ir saugomi specifiniai navigacijos ir veiksmų duomenys, kurie gali būti perkeliami iš EPROM. Šios atminties maitinimo galia, tiekiama iš kompiuterio galios šaltinio ir vyksta tuo metu, kai tai nurodo FMS. Kai galingumas atjungiamas, atminties elementai automatiškai persijungia į žemos galios atsargos būseną, kuri specialiai numatyta duomenims išsaugoti.
– ***Greitaeigė operatyvioji laisvojo priėjimo atmintis*** (HS RAM). Joje saugomos darbinės programos, kurios gali būti keičiamos CDU signalais.

FMS turi atminties lauką, jungiantį dvi duomenų bazes:

1. ***Vykdymo duomenų bazė*** turi vidutinio orlaivio modelį ir jo variklius. Šis modelis aprūpina FMS duomenimis, reikalingais orlaivio polinkio ir traukos komandoms apskaičiuoti. Be to, tiesiogiai susijusius duomenis galima atvaizduoti, ir tai sumažina ekipažo nurodymų reikalingumą, vadovaujant skrydžio metu. Duomenų atmintis:

– orlaivio oro pasipriešinimo charakteristikos;
– variklio eksploatacinės savybės;
– maksimalus, optimalus ir minimalus aukščiai;
– greičiai ir greičių ribos;
– skrydžio greičio ir aukščio galimybės, neveikiant vienam varikliui.

Individualiųjų orlaivių aptarnavimo grupė gali patikslinti šiuos duomenis, įvesdama koreguojančius daugiklius orlaivio pasipriešinimo ir kuro sąnaudų parametrams, kurie naudingai išsaugoti NV RAM atmintyje, kad būtų vėliau vėl panaudoti.

2. ***Navigacijos duomenų bazė*** turi gausų duomenų elementų kiekį, kurie įprastai naudojamoje erdvėje priklauso nuo skrydžio operatoriaus ir orlaivio tipo. Visi be išimties duomenų paketai, atsiradę Skrydžių valdymo tarnyboje, įregistruojami magnetinėje juostoje. Vėliau duomenys perrašomi į NV RAM atmintį, naudojant prie FMS prijungtą portatyvųjį duomenų perdavimo įrenginį.

Paprastai egzistuoja dvi navigacijos duomenų bazės – viena aktyvioji, kita pasyvioji. Aktyvioji dalis yra efektyviai naudojama iki specialiai nustatytos datos, o pasyviojoje dalyje laikoma duomenų pakeitimo informacija kitam efektyviam periodui.

Kad laiku aprūpintų navigacinių duomenų ir procedūrų keitimą, kiekviena navigacijos duomenų bazė atnaujinama ne mažesniais kaip 28 dienų laiko intervalais, nors jos duomenų atminties laikas – 56 dienos.

2.2.7 pav. parodyti navigacinės duomenų bazės turimi elementai.

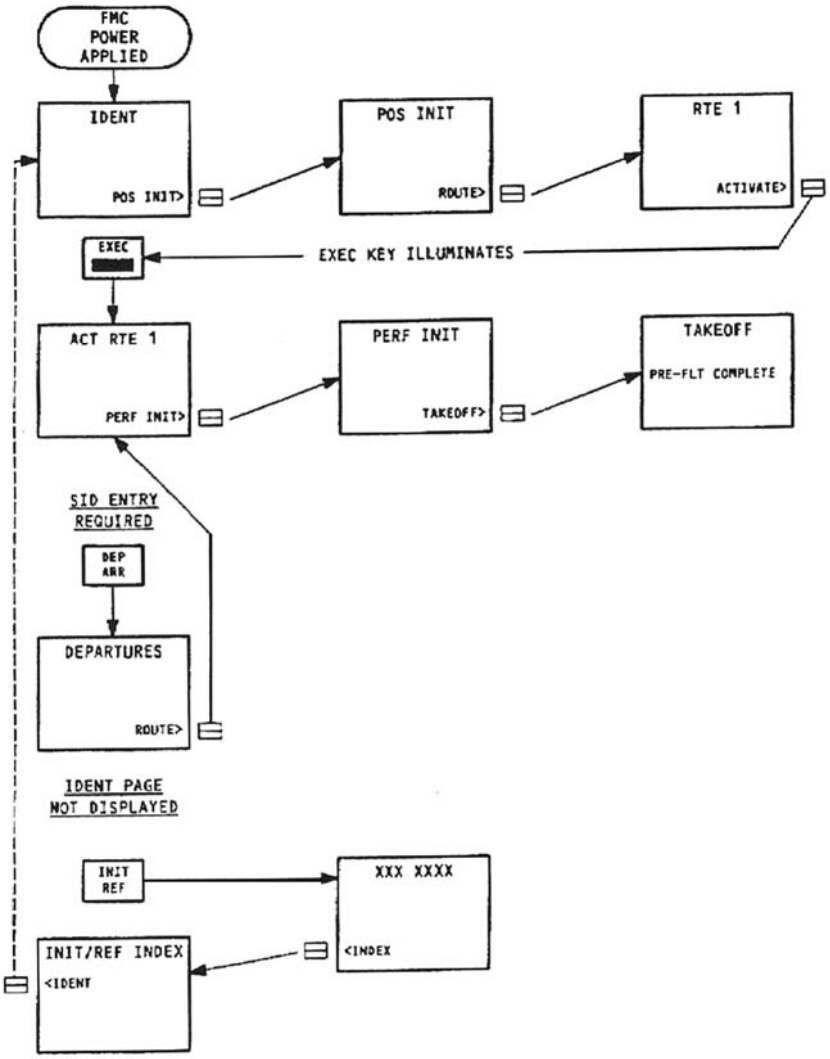
ITEM	DATA HELD
Radio Aids	Indentifier, position, frequency, type of aid, DME elevation. VOR, magnetic variation, ILS category and centre line bearing. The maximum distance an aid can be tuned at normal cruise altitudes.
Waypoints	ICAO indentifier; type (enroute / terminal). Position (latitude / longitude).
Enroute Airways	Designator; out magnetic course.
Airports	ICAO four letter indentifier, position, elevation, alternates.
Runways	ICAO indentifier, number, length, heading, threshold position, final approach fix (FAF) Ident. Any threshold displacement.
Airport Procedures	ICAO code; type (SID, STAR, ILS, RNAV etc) runway number / transmission, path and termination code.
Company Route	Origin airport, destination airport, route number; details of SID, route, STAR, approach.

2.2.7 pav. Navigacinės duomenų bazės turinio pavyzdys

2.2.7. Pagrindiniai FMS procesai

Pasiruošimas skrydžiui. Pasiruošimo skrydžiui metu skrydžio plano informacija įrašoma į CDU. Ši informacija nustato skrydžio pradžios punktą, įvedamą inercinių navigacinių sistemų veikimo atskaitai, norimo skrydžio maršruto tikslą, duomenis horizontaliajai navigacijai L-NAV ir vertikaliajai navigacijai V-NAV inicijuoti. Prireikus CDU gali būti panaudotas ir skrydžio planui skrydžio metu pakeisti.

Kada elektros maitinimas orlaivyje išvykstant įjungtas, valdymo vaizduoklyje CDU pateikiamas puslapis su kilimo priešskrydinės kontrolės procesu (2.2.8 pav.).



2.2.8 pav. Pasiruošimo skrydžiui kontrolės algoritmas

Taigi kiekviename pasiruošimo skrydžiui puslapyje tikrinami būtini įvedimo duomenys, spaudžiant žemiau esantį eilutės pasirinkimo klavišą ir peržiūrint kitą puslapį. Patikrinus duomenis, nustatomas skrydžio maršruto trasos aktyvavimas ACTIVATE ir užsidega klavišas EXEC. Paspaudus klavišą EXEC, baigiamas nustatytosios skrydžio maršruto trasos aktyvavimas.

Jei trasa įvesta į standartinę posistemę *išvykimas* SID (***Standart Instrument Departure***), nuspaudžiamas klavišas DEP/ARR. Naudojamas žemiausias dešinysis eilutės klavišas tam, kad po priešskrydinio pasiruošimo būtų galima pereiti prie SID užduoties pasirinkimo. Pasiekus pažymos puslapį *kilimas* TAKEOFF, vaizduojamas užrašas PRE-FL COMPLITE, patvirtinantis, kad atlikti visi reikami pasiruošimo skrydžiui įvadai.

Jei IDENT puslapis, vykstant priešskrydiniam pasiruošimui, vyksmo metu nerodomas, tai IDENT puslapis išvedamas kitaip, spaudžiant klavišą INIT REF.

Kelyje. Skrendant CDU naudojamas tam, kad prireikus būtų galima keisti skrydžio planą, atvaizduoti navigacijos duomenis ir vykdymo nurodymus.

Pirmiausia pasirenkamas reikiamas duomenų puslapis, spaudžiant klavišą **Function / Mode,** tai yra specifinių užduočių komanda. Pavyzdžiui, judėti kryptimi DIR; kilimo padėtis; įėjimo ar išėjimo būdas ir t. t. HOLD. Paskui, jei reikia, įrašomas užduodamas pasikeitimas.

Pavyzdžiui, nurodant skristi iš esamos orlaivio padėties naujojo kelio punkto kryptimi, spausti klavišą DIR/INTC ir įvesti trasos punktą į atsirandančią „pasakinėjimų dėžutę“ arba atsakymu į „kas, jei“ tipo klausimą pasirinkti puslapį, kuriame rodoma nustatytoji informacija ir įvedamos per klaviatūrą patikslintos skrydžio sąlygos. Tai atlikus, CDU rodo galimas įvykių prognozes, jei pakitimai bus vykdomi. Tada pilotai turi pasirinkimą ištrinti arba vykdyti pakitimus.

Horizontalioji navigacija (L-NAV). Valdant horizontaliojoje plokštumoje (L-NAV), skrydžio valdymo sistemos kompiuteris pagal skrydžio programą valdo orlaivio kryptį, tuo palaikydamas ar keisdamas skrydžio kursą. Taip valdoma aktyvioji skrydžio trajektorija. Kompiuteris apdoroja navigacijos priemonių duomenis, palygina juos su skrydžio programa ir nuokrypai proporcingus signalus siunčia į AFCS posvyrio (eleronų) kanalą. Valdymą horizontaliojoje plokštumoje L-NAV galima įjungti tik tada, kai orlaivis yra arčiau kaip 3 mylios nuo kelio linijos arba kai kampas tarp orlaivio išilginės ašies ir kelio linijos neviršija 90°. Veikimo būdas L-NAV gali automatiškai išsijungti, pavyzdžiui, pasibaigus aktyviajai kelio atkarpai (pasiekus tarpinį kelio punktą).

Gaunami iš FMS L-NAV nurodymai paprastai yra didelė krypčių grupė tarp trasos punktų tuo atveju, kai formuojama visa aktyvuotos skrydžio maršruto trasos sandara. Jei procedūros, esančios FMS duomenų bazės atmintyje, yra šios trasos dedamosios, FMS gali teikti komandas pastoviam kelio kursui palaikyti arba DME skliautui sekti, kaip to reikalauja procedūriniai nurodymai.

FMS nustato esamą orlaivio padėtį, pasinaudodama priimtais iš radijo švyturių IRS, DME ir VOR signalais ir bortiniais padėties nustatymo imtuvais. FMS garantuoja orlaivio skrydžio valdymo tikslumą, neperžengiant VOR/DME aplinkos ribų, net jei jo leistinasis nuokrypis sugriežtintas, GPS davikliais.

Skrendant AFCS pulte nustatytu magnetiniu kursu (HDG SEL), galima šį kursą pakeisti. Nustačius AFCS pulte naują kurso reikšmę ir nuspaudus jame HDG SEL mygtuką, ši reikšmė palyginama su kurso reikšme, kuri tuo metu gaunama iš kurso sistemos, pavyzdžiui, IRS. Signalas, proporcingas kursų skirtumui, siunčiamas į AFCS posūkio kanalą. Daromas orlaivio posūkis, keičiamas kursas ir toliau palaikomas naujasis kursas.

Valdant orlaivį radionavigacijos priemonių signalais (VOR/LOC), daromas orlaivio posvyris, kad būtų galima pakeisti kursą šių priemonių atžvilgiu. Nuspaudus VOR/LOC, jei pulte nustatytas VOR dažnis, orlaivis daro posvyrį, kol pasisuks į pasirinktąjį VOR kursą. Jei nustatytas ILS dažnis ir yra vedlio signalas, automatiškai mažinamos šoninės nuokrypos nuo tūptinės. Toliau orlaivio kursas palaikomas VOR arba ILS krypties kanalo signalais. Kai kuriuose orlaiviuose yra schemos, automatiškai išjungiančios (maždaug 20–25 s) valdymą pagal VOR signalus, kai orlaivis yra virš VOR švyturio. Tada orlaivis valdomas pagal kompiuterio atmintinėje likusius duomenis. Kai vienoje vietovėje yra ir VOR, ir DME, informacija iš DME atjungiama, kai barometrinio aukščio ir nuotolio iki DME skirtumas sumažėja iki 1500 m, buvusieji skrydžio duomenys įsimenami kompiuteryje.

Artėjant į KTT, galima įjungti lėktuvo valdymą pagal tūpimo sistemos ir radijo aukščiamačio signalus (APP).

Pilotas gali išjungti automatinį orlaivio valdymą ir atskirai įjungti minėtąsias valdymo funkcijas arba gali valdyti jį šturvaliniu būdu (CWS). Tada į lėktuvo plokštumų valdymo įrenginius signalai siunčiami ne iš kompiuterio, o iš kabinos vairų padėčių daviklių.

Orlaivio Macho greičiui viršijus 0,6–0,7, pradeda keistis aerodinaminės sparno savybės. Tuomet AFCS kompiuteris siunčia valdymo signalus aukščio vairui ir stabilizatoriui, nes reikia išlaikyti orlaivio centruotę. Konkreti Macho greičio reikšmė priklauso nuo orlaivio tipo, pavyzdžiui, orlaivyje „Boeing 737-500“ tai prasideda, kai M = 0,62. AFCS kompiuteris taip pat gerina lėktuvo stabilumą, valdydamas stabilizatorių, kada yra didelė variklių trauka ir mažas greitis, pavyzdžiui, kylant.

Vertikalioji navigacija (V-NAV). Valdant orlaivį vertikaliojoje plokštumoje (V-NAV), aukščio ir greičio signalai ateina iš skrydžio valdymo sistemos kompiuterio FMC. Valdoma pagal programą, kuri buvo įvesta šio kompiuterio valdymo pulte CDU. Programoje nurodyti kilimo, skrydžio maršruto, aukščio keitimo, žemėjimo ir artėjimo pagal ILS tūptinę duomenys, taip pat ir greičiai. Kompiuteris apdoroja navigacijos priemonių duomenis, lygina juos su skrydžio programa ir nuokrypai proporcingus signalus tiekia į

AFCS polinkio kanalą. Valdymas vertikaliojoje plokštumoje galimas veikiant ir automatiniu ar komandiniu būdu.

Aukštėjimas ir kruizas. Orlaiviui pakilus, V-NAV režimas įsijungia pakeitus variklių trauką iš pakilimui reikalingo traukos režimo į kitą traukos režimą ir MCP indikatoriuje nustačius didesnį orlaivio aukštį. Kai V-NAV režimas įsijungia, tai MCP indikatoriuje gali būti nustatomas bet koks orlaivio aukštis, netgi mažesnis už esamą, nepatiriant jokių nukrypimų nuo esamo orlaivio skrydžio lygio. Jei orlaivis kerta MCP indikatoriuje nustatytą aukštį, V-NAV režimas neatsijungia, kol orlaivis nepasiekia numatyto kruizinio aukščio.

FMC komandas siunčiantis V-NAV profilis nustato tokią variklių trauką (nebent skrydžio įgula pakoreguoja), kad orlaivio greitis aukštėjimo metu būtų susietas su konkretaus oro uosto apribojimais, kol nebus kertamas apribojimų aukštis, virš kurio orlaivis iki numatyto kruizinio aukščio palaiko ekonomiškiausią greitį. Aukštėjimo metu orlaivis išlaiko visus į aktyvųjį maršrutą įvestus ir SIO dalį sudarančius aukščio apribojimus. Orlaivis išlaiko ekonomiškiausią greitį iki aukščiausio kopimo taško, kuriame jo trauka apribojama ties didžiausia kruizinio skrydžio trauka.

Jei aukštėjimo metu, išlaikant tam tikrą greičio profilį, bus pažeistos aukščių apribojimo ribos, COU indikatoriuje įsižiebs pranešimas UNABLE NEXT ALT. Tuomet skrydžio įgula turi rankiniu būdu sureguliuoti orlaivio greitį, taip pakoreguodami aukštėjimo kampą.

Žemėjimas. FMC apskaičiuoja žemėjimo trajektoriją, kai įvedamas EJO taškas. (EJO yra maršruto taško aukščio apribojimas, kuriame reikalaujama palikti kruizinį aukštį ir pradėti žemėti. Dėl STAR arba APPROACH pasirinkimo EJO taškas paprastai įvedamas į maršruto atkarpos duomenų puslapį).

Pasirinkti greičiai keičiami maršruto atkarpos ir žemėjimo duomenų puslapiuose. Numatomos vėjo ir variklių traukos reikšmės taip pat keičiamos žemėjimo prognozės duomenų puslapyje.

Jei MCP indikatoriuje yra nustatytas žemiau orlaivio esantis aukštis, orlaiviui pasiekiant TOD tašką, FMC siunčia komandą sumažinti trauką ir daryti polinkį, kad orlaivis išlaikytų reikiamą žemėjimo trajektoriją. Jei orlaivis iki žemiausio aukščio apribojimo pasiekia MCP nustatytą aukštį, tai V-NAV automatiškai atsijungia. Žemėjimo metu MCP indikatoriuje gali būti nustatomas didesnis nei esamas orlaivio aukštis, nedarant įtakos V-NAV atsijungimo ar žemėjimo eigos sustabdymui.

Jeigu atsiranda nenumatytas (į žemėjimo prognozės duomenų puslapį neįvestas) priešinis vėjas, kuris gerokai sumažina orlaivio greitį, variklių trauka automatiškai padidinama, kad orlaivis išlaikytų numatytąjį greitį. Jeigu automatinė greičio kontrolės sistema nesuveikia, COU indikatoriuje įsižiebia pranešimas „THRUST REQUIRE“. Ir atvirkščiai, atsiradus nenumatytam kelio krypties vėjui, kuris gerokai padidina orlaivio greitį, COU indikatoriuje įsižiebia pranešimas „RAG REQUIRE“. Jei orlaivio greitis ribojamas, orlaivis skrenda ribotu greičiu, net jei dėl to neišlaiko apskaičiuotos skrydžio trajektorijos.

FMC netiksliems ir VST priartėjimams apskaičiuotomis trajektorijomis orlaivis skrenda iki taško, esančio 50 ft iki KTT. Skrydžio įgulai tuomet tenka atsakomybė nenužemėti žemiau MDA, kol nefiksuojamas adekvatus vizualusis orientyras. Ties nepavykusio užėjimo tašku vertikalus FMC profilis padidina variklių trauką, įveikdamas orlaivio kopimą į nepavykusio užėjimo aukštį.

Kuro kontrolė. Duomenis apie kurą FMC gauna iš kuro kiekio matavimo sistemos ir EICAS. FMC papildomai skaičiuoja kuro kiekius, kurie prieš užvedant variklius turi sutapti ir nuolatos atitikti kuro kiekio matavimo sistemos duomenis, nebent skrydžio įgula kuro kiekio reikšmes įveda rankiniu būdu. Kai FMC gauna signalą, kad varikliai užvesti, apskaičiuotos kuro reikšmės yra atsiejamos nuo kuro kiekio matavimo sistemos, kol varikliai po skrydžio neišjungiami. Užvedus variklius, apskaičiuotosios kuro reikšmės mažėja priklausomai nuo signalo, atitinkančio kuro įsiurbimo greitį, dydžio. Apskaičiuotosios reikšmės rodomos antrajame progreso duomenų puslapyje, taip pat skrydžio charakteristikų duomenų puslapyje, kur kuro reikšmės vaizduojamos kaip „CALC“, nebent kuro kiekio dydžiai buvo įvesti rankiniu būdu. Tuo atveju kuro reikšmės vaizduojamos kaip „MANUAL“.

Jeigu kuras pilamas jau FMC gavus signalą, jog varikliai užvesti (t. y. teigiamą signalą iš kuro įsiurbimo greičio matavimo sistemos), tai duomenys apie papildytą kuro kiekį neįtraukiami į apskaičiuotąsias kuro kiekio reikšmes. Šitaip gali atsitikti, jeigu varikliai išjungiami, o paskui pakartotinai užvedami, pavyzdžiui, riedėjimui iki kuro pildymo vietos. Rankiniu būdu įvedant kuro kiekio reikšmes skrydžio charakteristikų duomenų puslapyje, prieš tai ištrynus buvusius duomenis, galima išvengti tokių neatitikimų.

Signalai iš kuro įsiurbimo greičio matavimo sistemos taip pat panaudojami variklių sudeginamo kuro kiekio skaičiavimams. Prieš skrydį, kol visi varikliai išjungti, antrajame progreso duomenų puslapyje rodomi duomenys „FUEL USED“ pastatomi į nulinę padėtį.

Jeigu FMC tarp apskaičiuotųjų kuro kiekio reikšmių ir matavimo sistemos duomenų aptinka žymų neatitikimą, tai CDU indikatoriuje įsižiebia pranešimas „QTY ERROR-PROG 2/2“. Tuomet skrydžio įgula gali pasirinkti kuriuos kuro kiekio duomenis FMC turėtų naudoti likusio skrydžio laiko metu. Orlaiviui skrendant aktyviuoju maršrutu iki paskirties oro uosto, FMC nuolatos skaičiuoja orlaivio bakuose likusį kuro kiekį. Jei apskaičiuotoji likutinio kuro reikšmė tampa mažesnė už skrydžio charakteristikų duomenų puslapyje įvestą ***kuro atsargos reikšmę***, tai įsižiebia pranešimas „INSUFFICIENT FUEL“.

Reziumė. FMC gali valdyti orlaivio skrydį tiek išilginėmis trajektorijomis (navigacija), tiek jo skrydį vertikaliojoje plokštumoje (charakteristikų valdymas). FMC orlaivio valdymą gali pradėti iš karto po pakilimo ir tęsti, kol sistema užfiksuoja radijo švyturį ir tūptinės indikatorių. Standartinis FMC priima 24 skaitmeninius ir 3 atskirus (pavienius) signalus bei turi išėjimus 9-iems skirtingiems skaitmeniniams vartotojams.

2.3. Komandinė skrydžio valdymo sistema

Komandinėje skrydžio valdymo sistemoje FDS (*Flignt Director Sistem*), polinkio ir posvyrio komandos apdorojamos kompiuteriu, kad būtų išlaikomas tam tikras skrydžio režimas, kurį tuo metu pasirinko įgula. Ši skrydžių valdymo sistema gali surinkti informaciją iš skirtingų daviklių ir pateikti juos kaip polinkio ir posvyrio komandas. Įgulos nariams tai sumažina poreikį viską atidžiai stebėti ir analizuoti, prieš priimant tinkamą sprendimą. Visos iš FDS kompiuterio gaunamos komandos suformuojamos taip, kad pernelyg neperkrautų orlaivio karkaso.

2.3.1. FDS architektūra

Ši sistema sukurta iš komponentų ir vaizduoklio ekranų, kurie pateikti 2.3.1 pav. Taip pat čia parodytas įvesties įrenginių ir informacijos srautų pasiskirstymas.

2.3.2. FDS valdomoji informacija

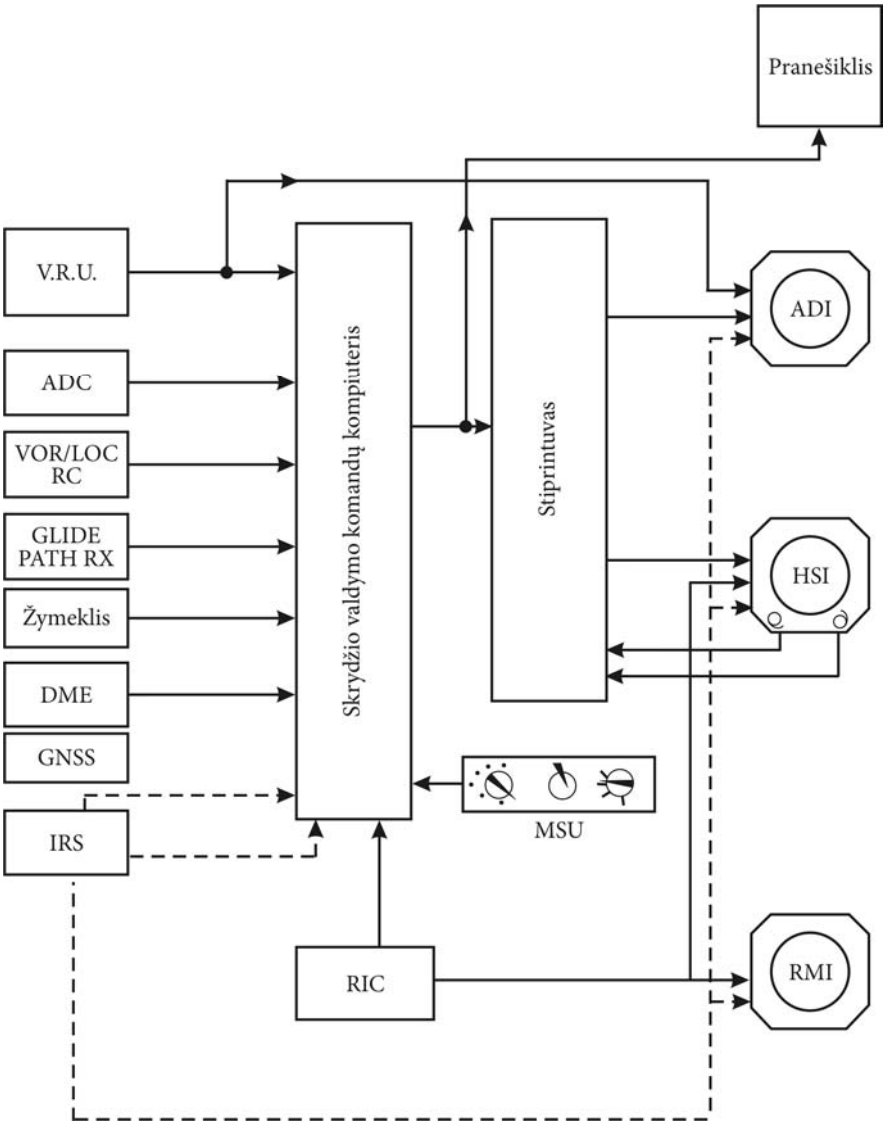
Skrydžio valdymo ekranas gauna polinkio ir posvyrio informaciją iš skrydžio valdymo kompiuterio, kuris gali būti automatinės skrydžio kontrolės sistemos dalis arba gali būti visiškai nepriklausomas. 2.3.2 pav. parodyti tipiniai sistemos informaciniai šaltiniai.

Vertikalo giroskopas (aviahorizontas). Orlaivio polinkio ir posvyrio padėtys yra pirminės ir pagrindinės visiems kompiuterio režimams. Bet koks manevras reikalauja tam tikros polinkio ir (arba) posvyrio padėties. Bet kokia klaida sukelia skrydžio valdymo funkcijų sutrikimus. Polinkio ir posvyrio parametrams įvesti į sistemą gali būti naudojami vertikaliojo girokoskopo grupės prietaisai arba girokoskopinės stabilizuojamosios inercinės navigacijos sistemos (INS), arba (IRS) inercinės koordinačių sistemos.

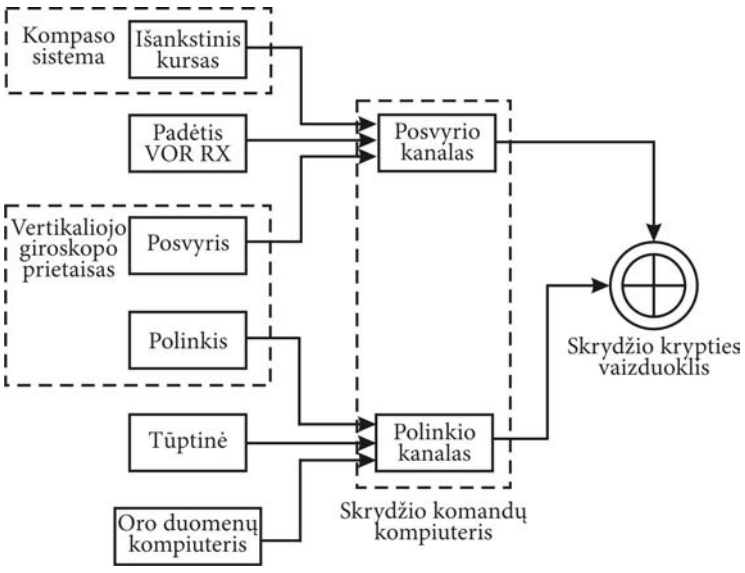
Kompasas. Magnetinio kurso įvesties įrenginiai reikalingi, kad palaikytų kursą ir vykdytų pasirinktas funkcijas. Taip pat naudojama kaip svarbus įvesties šaltinis radijo operacijoms kompaso informacija, kai nuokrypių nuo kurso signalai gaunami iš nuotolinės indikacijos giromagnetinio kompaso sistemos (RIC).

Švyturys/VOR. VHF navigacijos įtaisas aprūpina įvesties įrenginius, kad jie galėtų užimti ir sekti VOR. Švyturio įvestis gali būti panaudota kaip šalutinė navigacinė funkcija ar gali būti atvaizduota kartu su orlaivio leidimosi fazės komandomis, vedant tūpimo trajektorija.

Tūptinė (Glide Path). Leidimosi trajektorijos imtuvas tiekia kompiuteriui informaciją, kuri gaunama lyginant reikiamą orlaivio kryptį su esamu padėties kampu, leidžiantis tūptinės atžvilgiu. Šio režimo būtina sąlyga, kad apdorojant kompiuteryje posvyrio kanalo tūptinės nuokrypius, polinkio kanale būtų formuojamos padėties joje komandos.



2.3.1 pav. FDS architektūra



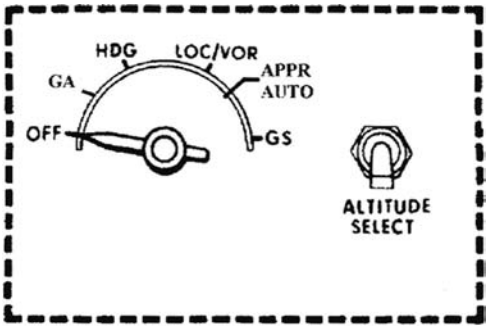
2.3.2 pav. Pirminiai navigacinės informacijos duomenų šaltiniai

Oro duomenų kompiuteris (ADC). ADC aprūpina signalais įėjimus, susijusius su IAS (*Indicated Air Speed*), Macho skaičiumi, vertikaliuoju greičiu ir aukščiu. Skrydžio valdymo kompiuteris taip pat sukuria komandas pagal kelis ar visus iš šių įėjimų.

2.3.3. Skrydžio valdymo kompiuteris (FDC)

Informacija, gauta iš skirtingų šaltinių, yra apdorojama kompiuteriu ir priklauso nuo nustatyto režimo. Režimo nustatymo blokas MCU (*Mode Control Unit*) aprūpina reikiamomis pozicijos ir vairavimo komandomis. Šios komandos siunčiamos į ekraną arba į automatinę skrydžio valdymo sistemą (AFCS).

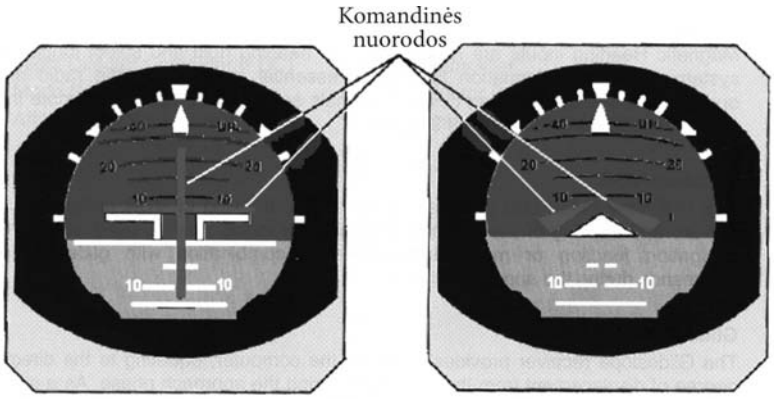
Režimo kontrolės blokas leidžia orlaivio įgulai susisiekti su FDC priklausomai nuo skrydžio fazės (2.3.3 pav.).



2.3.3 pav. Režimo nustatymo bloko valdymo pultas

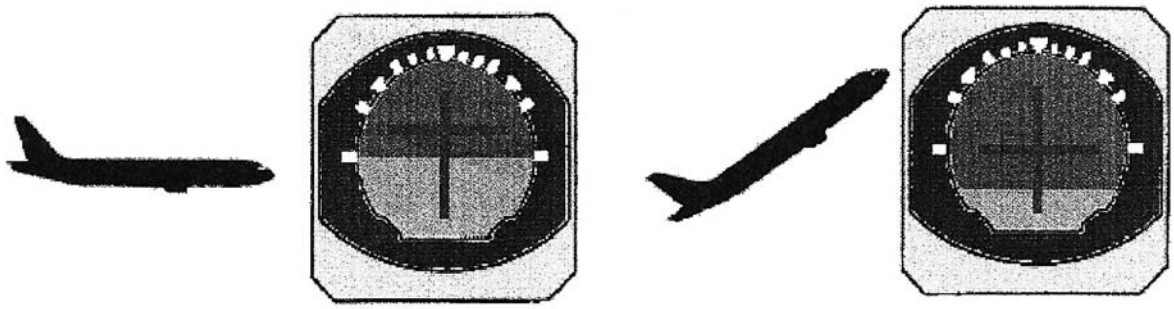
2.3.4. Skrydžio valdymo kompiuterių vaizduokliai

Skrydžio valdymo kompiuterių vaizduokliai (2.3.4 pav.) susideda iš indikatoriaus, turinčio polinkio ir posvyrio komandų juosteles arba „V“ juosteles, kurios dažnai yra derinamos su padėties indikatoriaus.



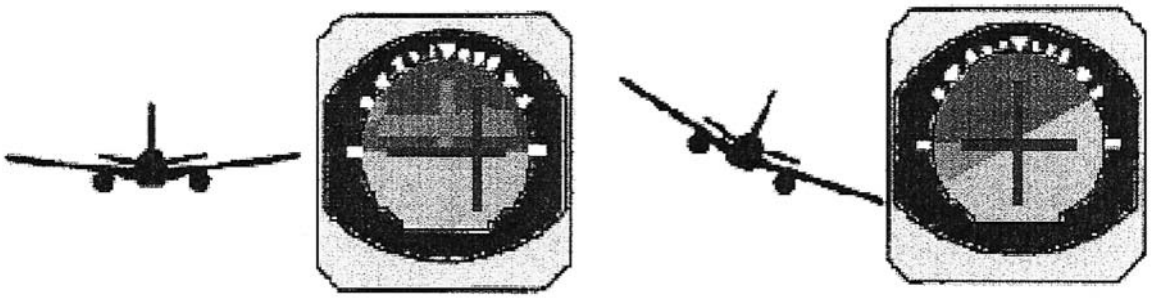
2.3.4 pav. Skrydžio valdymo vaizduokliai

Polinkio juostelės judesys į viršų reikalauja, kad vairalazdė būtų atitraukta, tol kol juostelė susicentruoja. Kai susicentravusi juostelė parodo, kad pasiekta reikiama polinkio pozicija (2.3.5 pav.).



2.3.5 pav. Polinkio nustatymas

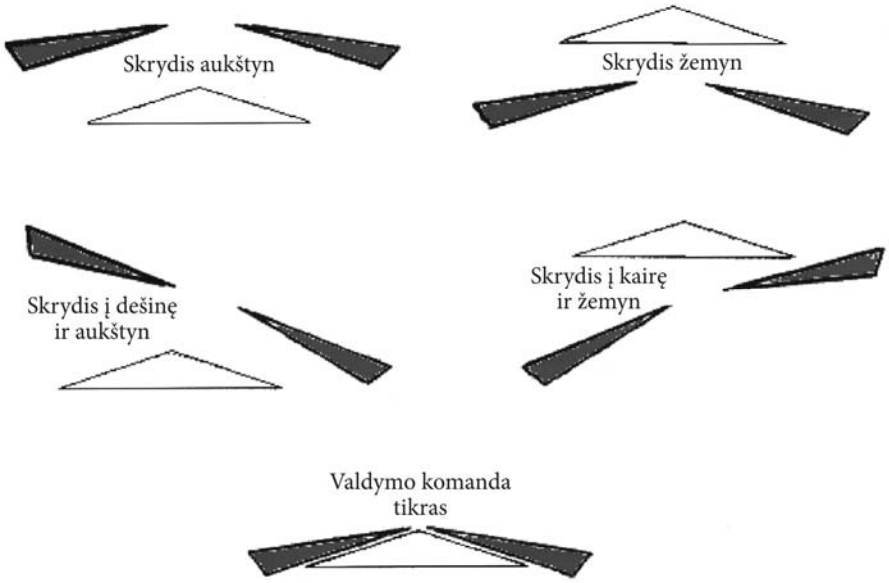
Atvirkščiai, posvyrio juostelės poslinkis į kairę ar dešinę reikalauja pasukti orlaivį į kairę arba dešinę, kad susicentruotų juostelė ir patenkintų kompiuterio nurodymą pasukti orlaivį (2.3.6 pav.).



2.3.6 pav. Polinkio juostelė viršuje – kilti, posvyrio juostelė dešinėje – sukti į dešinę

Remiantis faktu, kad komandų juostelės nuokrypis yra atskirų sistemų įėjimų susijungimo rezultatas, nelaikyti jų pozicinėmis, norint rasti reikalingą padėtį.

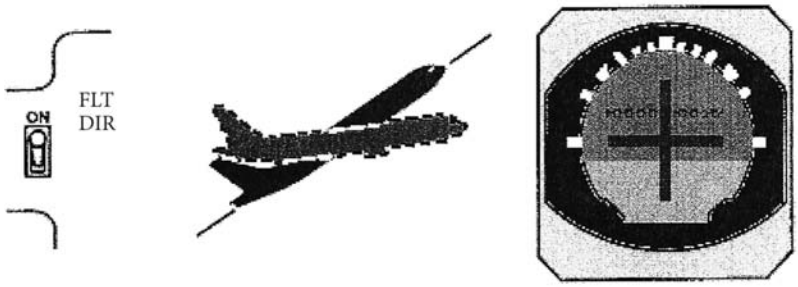
Gali būti naudojamas ir „sparno“ tipo atvaizdavimo būdas. Tada komandos atrodytų šitaip (2.3.7 pav.).



2.3.7 pav. „Sparno“ pavidalo orlaivio žymeklio naudojimas

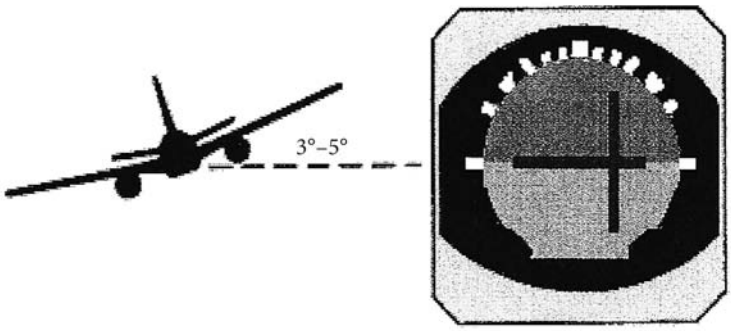
2.3.5. Skrydžio valdymo operacijų režimai

Padėties režimas. Kai nėra parinktas joks kitas režimas, tai padėties režimas yra šios sistemos pagrindas. Komandų juostelės rodo orlaivio polinkio ir posvyrio padėtį, kai komandinė skrydžio valdymo sistema yra įjungta, padėtis „ON“ (2.3.8 pav.) Padėties informacija, nustatoma vertikaliuoju giroskopu (VG), atsispindi ekrane, pagal kurį orlaivio padėtis koreguojama ir stebimi galimi padėties nuokrypiai.



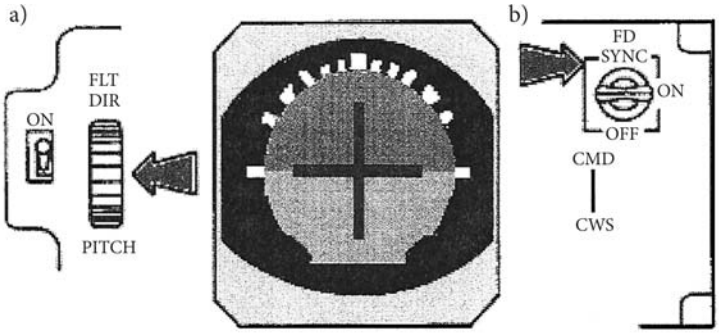
2.3.8 pav. Orlaivio padėties vaizdavimas

Daugumoje sistemų, jei orlaivis yra netoli horizontaliosios padėties, dažniausiai 3°–5°, skrydžio valdymo komandos juostelė palaiko šią padėtį vaizduoklio ekrane ir magnetinį kursą (2.3.9 pav.).



2.3.9 pav. Leistinojo posvyrio lygis

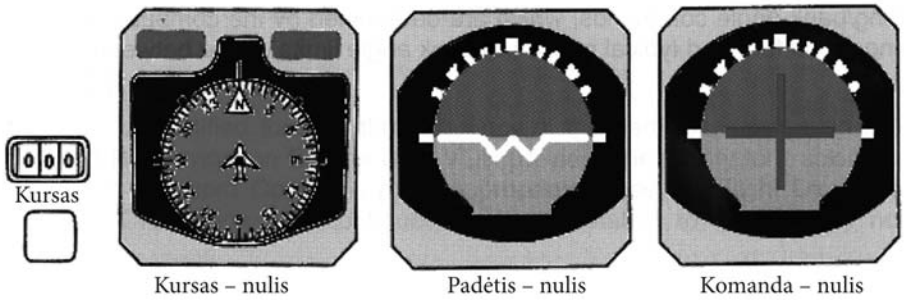
Kai kuriose skrydžio valdymo sistemose įgula gali komandų juosteles perstatyti į kitą padėtį. Tai pasiekiama per jungiklį, kuris leidžia komandų juosteles sucentruoti tam tikram polinkiui ir posvyriui (2.3.10 pav., a) arba su trimeriu, kuris leidžia polinkio komandos juostelę perstumti kaip parodyta 2.3.10 pav.,b.



2.3.10 pav. Padėties juostelių derinimas

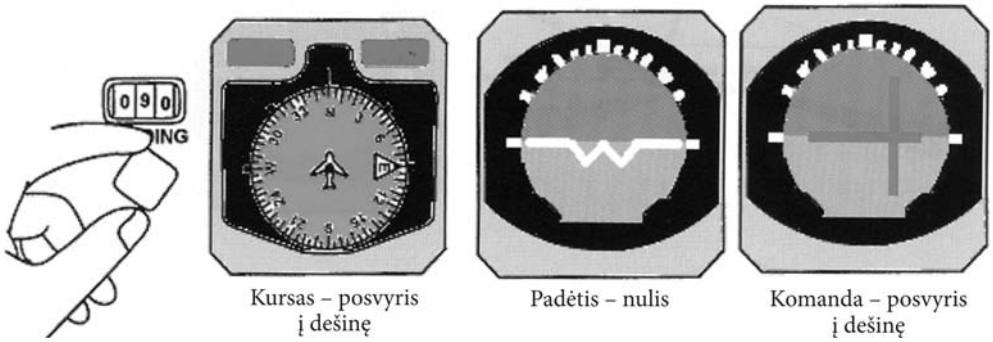
Šie paaiškinimai rodo, kad padėčiai ir skrydžiui valdyti vaizduoklyje yra atskiri įtaisai, tačiau jie dažniausiai sujungti kartu į vieną prietaisą, vadinamąjį padėties valdymo indikatorių ADI (*Attitute Director Indicator*).

Kursas. Su pasirinktu kursu skrydžio valdymo sistemos komandos juostelė duoda nuorodą skristi orlaiviui nutatytu kursu ir jį palaikyti. Kad tai pasiektų, kompiuteris turi įvadus iš orlaivio padėties nustatymo šaltinio VG ir kryptį pagal kompasą. Polinkio padėtis ar aukščio palaikymas yra suderinami ir prieinami kurso režime. Kai orlaivis skrenda nustatytu kursu, komandų juostelės atrodo štai taip (2.3.11 pav.):



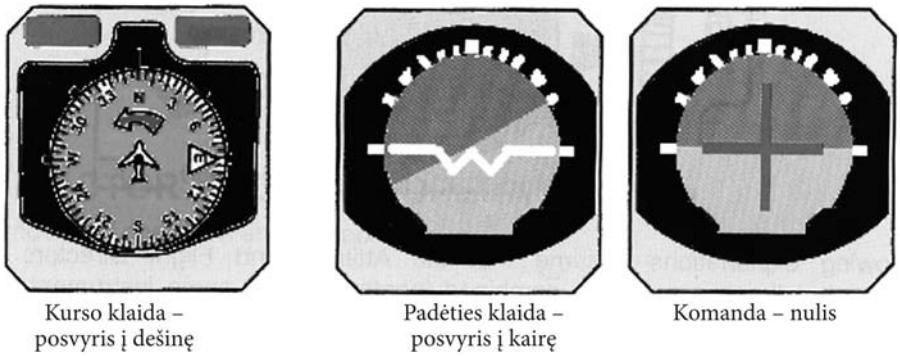
2.3.11 pav. Kurso komandų vaizduokliai

Jei vėliau pasirenkamas kitas orlaivio kursas, tai kurso klaida (skirtumas tarp pasirinktojo ir tikrojo kurso) rodoma komandų juostelėmis.



2.3.12 pav. Kurso kitimo nuorodos manevro pradžioje

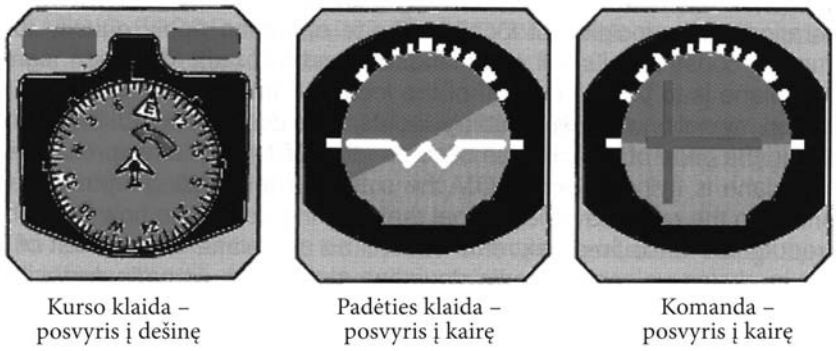
Kai orlaivis pakrypsta pagal komandos reikalavimą, tai padėties fiksavimo šaltinis siunčia kompiuteriui signalą, kuris yra priešingas nuokrypio (klaidos) signalui. Kai nustatytas posvyrio kampas yra tinkamas, tai kurso klaidos ir padėties signalai anuliuoja vienas kitą. Posvyrio komandos juostelė grįžta į centrą ir kontrolės ratukas taip pat grįžta į centrą (2.3.13 pav.).



2.3.13 pav. Kurso kitimo nuorodos manevro pabaigoje

Kai orlaivis yra pasviręs ir sukasi, kurso klaida nuolat mažėja, tai sukelia kompiuteryje priešingą posvyrį, atsakant į padėties duomenis pasukti orlaivį nauju kursu. Kai orlaivis skrenda naujuoju kursu, komandų juostelės ir kontrolės ratukas vėl susicentruoja, kaip parodyta paveiksle.

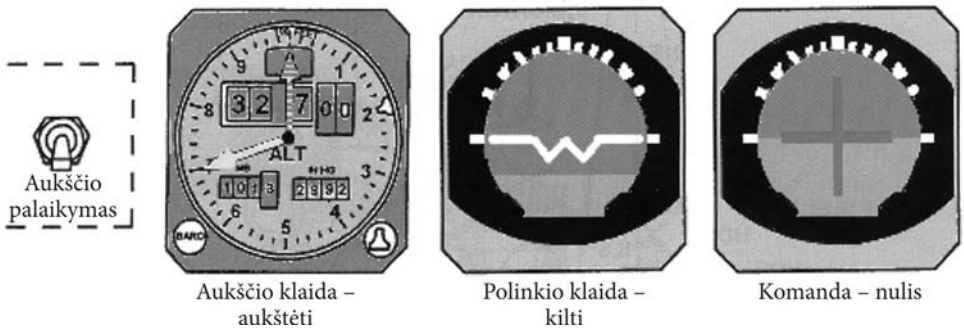
Kurso ir pokrypių kampų komandos, kurias nustato kompiuteris, yra ribojamos pirmiausia keleivių komfortui, todėl paprastai maksimalūs posvyrio kampai yra 30–35° ribose (2.3.14 pav.).



2.3.14 pav. Kurso ir pokrypių kampų komandos

Aukščio palaikymas (2.3.15 pav.). Jei yra pasirenkamas aukščio palaikymo režimas, tai padėties palaikymo režimas atšaukiamas automatiškai ir paruošiama atitinkamoms polinkio komandoms esamam aukščiui palaikyti. Šis režimas suderinamas su visais horizontalės komandų režimais ir su tūptinės režimu, kol „pagauna“ tūptinę.

Kai parenkamas šis skrydžio valdymo režimas, bet koks nukrypimas nuo tam tikro aukščio atsispindi vaizduojamose polinkio komandose. Pagal komandą polinkio padėties signalas nukreipiamas į kompiuterį, priešingas atsiradusio aukščio nuokrypio (klaidos) signalui.



2.3.15 pav. Aukščio palaikymo komandiniai vaizduokliai

Suminis signalas ir rezultatas yra toks pats, kaip ir kurso valdymo režime. Modernus skrydžio valdymo kompiuteris gali turėti kelis polinkio valdymo režimus (IAS palaikymo, Macho skaičiaus palaikymo, vertikaliojo greičio palaikymo), o kai kurie turi galimybę teikti komandas, susijusias su vertikaliosios navigacijos profiliais, formuojamais skrydžio valdymo kompiuteriu. Tačiau visos vienu metu tiekiamos komandos yra atsakingos tik už vieną polinkio režimą.

Vietos nustatymo švyturys (LOC/VOR). Šio režimo įjungimas atpažįstamas pagal pagalbinės navigacijos priemonės dažnį, kuris parenkamas labai aukštų dažnių ruože (VHF). VOR teikia galimybę aptikti pasirinktą VOR‘o spindulį, nors žodis „kursas“ yra tinkamesnis nuo tada, kai skrydžio valdymo kompiuteris palengvina perskridimą virš VOR‘o stoties ir atlieka tolesnį valdymą, kuris vadinamas *outbound* radialu.

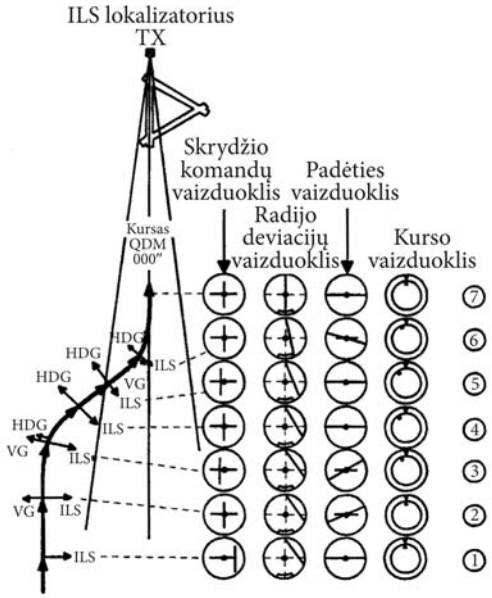
VOR‘o režime orlaivio įranga automatiškai jaučia bet kokią stoties būseną, praskrendant virš jos, arba kūgio formos erdvės dalį, kurioje galimas sutrikimas, aprūpindama skrydžio valdymą komandomis, kurios naudojamomis tuo trumpu laiko tarpsniu kai skrendama virš stoties.

Vietos aptikimo švyturio režimas aprūpinamas siunčiamo signalo pagavimo ir sekimo funkcijomis. Išskyrus VOR‘o praskridimo „virš stoties“ aplinkybę, vietos aptikimo švyturio panaudojimo principas toks pats kaip ir VOR‘o. Šiame režime kompiuteris sukuria posvyrio komandas pagal radijo nuokrypio signalus, priklausomai nuo to, ar orlaivis yra dešiniau, ar kairiau nuo švyturio. Svarbu, kad kompiuteris taip pat sumuoja radijo nuokrypio signalus su kurso duomenimis, kurie derinasi su KTT praskidimo kursu arba QDM. VOR‘o atveju tai yra QDM arba abipusė priklausomybė nuo to ar orlaivis skrenda stoties link, ar nuo stoties. Kurso duomenys reikalingi nes radijo nuokrypio signaluose, kurie nurodo orlaivio nuokrypų dydžius ir veiksmus – sukti į kairę ar į dešinę, nėra kurso informacijos. Ekstremaliais atvejais, kai orlaivis yra į kairę nuo švyturio, jis skrenda į dešinę ratu, nebent radijo nuokrypio signalas buvo suderintas su kursu. Svarbu, kad visi manevrų reikalavimai būtų suvedami į polinkio ir posvyrio padėtis.

Kita diagrama (2.3.16 pav.) rodo, kaip skrydžio valdymo posvyrio komandos apdorojamos priklausomai nuo radijo nuokrypos, padėties ir kurso.

1. Orlaivis (t. y. jo sparnų lygis), jei jis yra į kairę nuo švyturio (FLY RIGHT), sukelia skrydžio valdymo kompiuteryje posvyrio į dešinę (ROLL RIGHT) komandą.
2. Orlaivio posvyrio į dešinę metu, padėties klaidos (ATTITUTE ERROR) ir nuokrypio nuo kurso (DEVIATION) signalai yra priešingi vienas kitam. Posvyrio komandos juostelės susicentruoja ir orlaivis yra ant KTT tiesiosios.
3. Kai orlaivis nusuka nuo KTT, pagal magnetinį kursą (MAGNETIC HEADING) ir posvyrio signalą (ROLL LEFT) jis sukasi tol, kol atsiduria horizontalioje padėtyje.

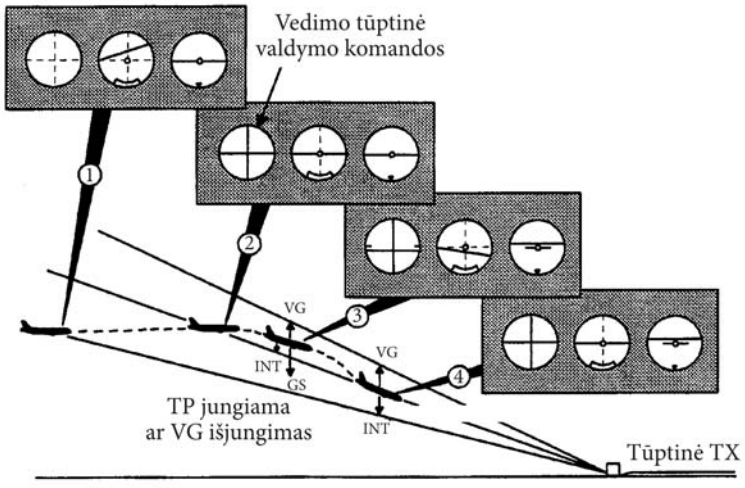
4. Kai orlaivis yra horizontalioje padėtyje ir artėja prie KTT tinkamu kampu, kurso klaidos (HEADING ERROR) ir nukrypo nuo kurso (RADIO DEVIATION) signalai yra priešingi ir sucentruoja komandos juosteles.
5. Nuokrypio (RADIO DEVIATION) signalas po truputį mažėja ir dominuojantis kurso klaidos (HEADING ERROR) signalas atsispindi skrydžio valdymo kompiuterio komandoje posūkiu į kairę (ROLL LEFT), kad sumažintų kampą į KTT centrinę liniją.
6. Orlaivis tęsia posvyrį koordinuojamas nuokrypio ir posvyrio padėčių signalų.
7. Dabar orlaivis yra tiesiojoje į KTT.



2.3.16 pav. Padėties komandų priklausomybė orlaiviui kečiant skrydžio kursą

Tūptinė (GS). Šis režimas aprūpintas tūptinės ar švyturio pagavimu ir radimu, kai tūptinės imtuvo (UHF) dažnis yra suderintas su švyturio dažniu. Kai režimo jungiklis nustatomas į padėtį TŪTINĖ su nustatytu ILS dažniu, švyturio ir tūptinės nuokrypio signalai bus tiekiami į kompiuterį.

Kurso režimas gali būti naudojamas pradiniam artėjimo į švyturį radijo signalui nustatyti arba aukščio palaikymas gali būti naudojamas tūptinei sugauti. Kai orlaivis yra švyturio zonoje, režimo selektorius nustato tūptinės padėtį. Skrydžio valdymo kompiuteris dabar sukuria reikalingas posvyrio komandas, pagavęs tūptinę, aukščio palaikymo režimas automatiškai atsijungia (2.3.17 pav.).



2.3.17 pav. Padėties komandų priklausomybė orlaiviui tūpiant

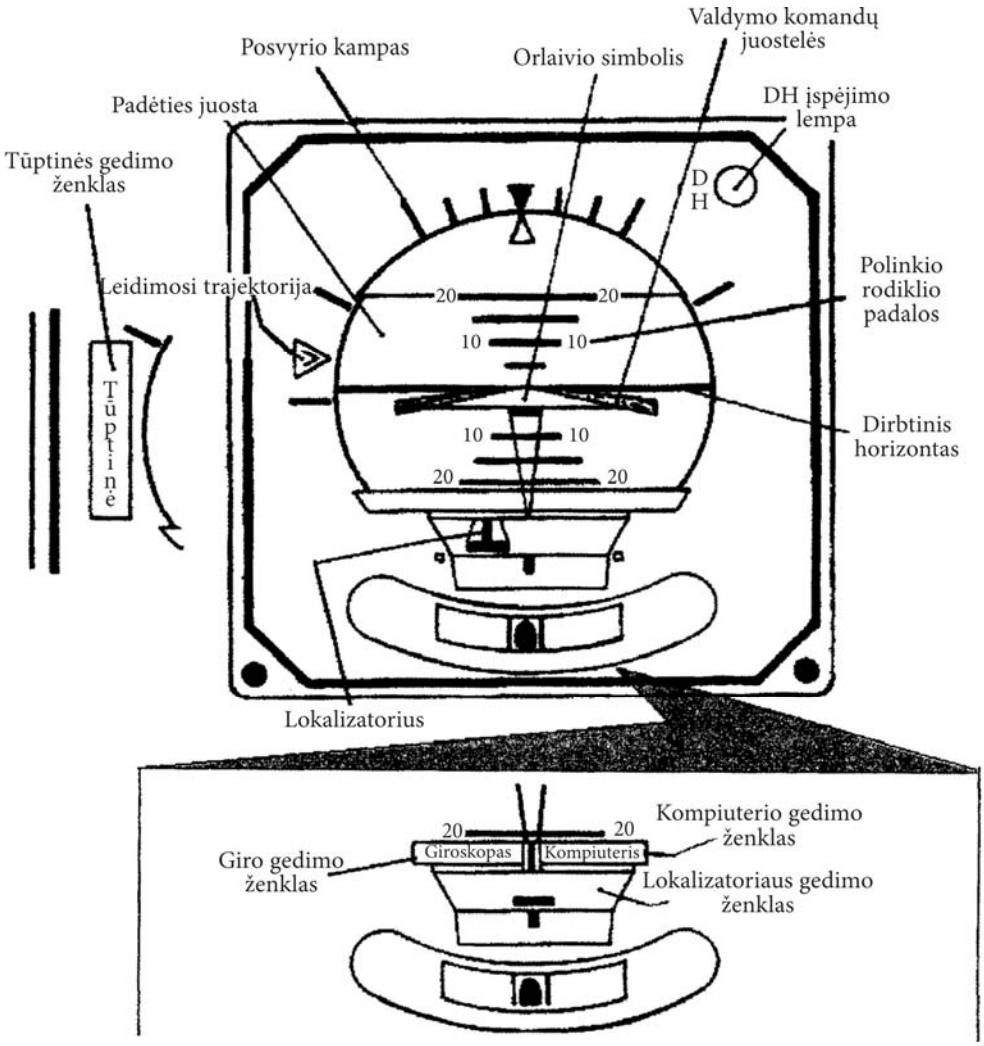
1. Pagavimo fazės pradžia. Aukščio palaikymo (ALTITUDE HOLD) režimas atsijungia ir kompiuteris ignoruoja pradinį skristi aukštyn (FLY UP) signalą, taigi užkerta kelią komandoms, kurios lieptų orlaiviui kilti į viršų (PITCH UP), kad surastų ir sektų tūptinę.
2. Orlaivis yra tūptinėje su nuliniu nuokrypiu ir be polinkio klaidos.
3. Orlaivis praskrenda tūptinę, kompiuteris reaguoja į tai ir siunčia komandą skristi žemyn (FLY DOWN). Kai orlaivis vykdo nosies žemyn polinkio keitimo signalo komandą (PICH DOWN), tai sukelia padidėjusį polinkio klaidos (PITCH ATTITUTE ERROR) signalą, priešingą tūptinės signalui. Sudedamoji grandinė kompiuteryje sukuria signalą, priešingą vertikaliojo giroskopo (aviahorizonto) padėties (VG PITCH ATTITUTE) signalui ir polinkio komandos vaizduojamos tam, kad būtų matoma orlaivio padėtis tūptinės atžvilgiu.
4. Dabar orlaivis yra tūptinėje su truputį nuleista nosimi.

Antrasis ratas (GA). Šis režimas naudojamas, kai nueinama į antrąjį ratą po nepavykusio artėjimo ir kompiuteris signalizuoja komandų juostelėms pradėti polinkį į viršų. Šis režimas automatiškai parenkamas jei traukos droselio (GA) mygtukas aktyvuojamas.

Režimo informatorius. Šioje būsenoje vizualiai primenama, koks sistemos veikimo režimas tuo metu yra įgulos parinktas. Režimo pranešiklis (2.3.1 pav.) yra prietaisų skydelyje, kuriame, parinkus tam tikrą režimą, užsidega jį nurodanti lemputė. Režimo informatoriai kartais yra išimtinai skirti skrydžiui valdyti, kol kiti derinami su FD ir AFDS režimais, su FD pranešikliais, išdėstytais kairėje pusėje, ir AFDS pranešikliais dešinėje EADI pusėje.

2.3.6. Orlaivio padėties komandinio valdymo vaizduoklis

Orlaivio vertikaliosios padėties valdymo tipinio vaizduoklio bendrasis vaizdas parodytas 2.3.18 pav.



2.3.18 pav. Orlaivio vetikaliosios padėties komandinio valdymo vaizduoklis

Pakilimui, kai įjungtas skrydžio valdymo kompiuteris prieš pakilimo posvyrį, į posvyrio komandas įeina sparnų lygio komandos per visą pakilimo laiką, bet polinkio komandų juostelės rodo, kad nosis yra 10° žemiau. Pasiekus 60 mazgų greitį, 15° nosies kėlimo į viršų komanda ir tinkamas V_R patiekiami pilotui, taigi pilotas didina polinkį, kol FD yra patenkintas.

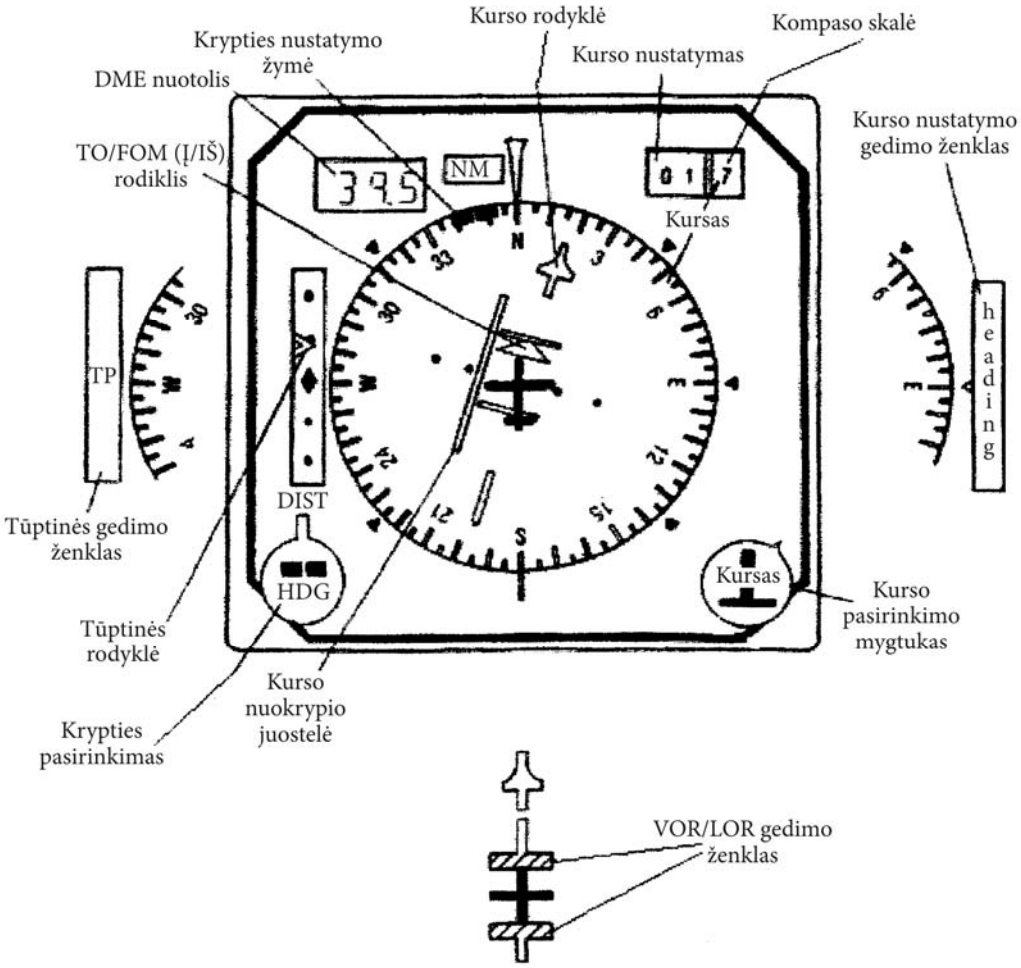
Kai keičiami skrydžio lygiai, įvedamas reikalingas skrydžio lygis į FMC per MCP. Pavyzdžiui, jei orlaivis kyla į kreiserinį skrydžio aukštį, tai naujas skrydžio lygis įvedamas į skrydžio valdymo kompiuterį, kuris kuria kilimo komandas. Orlaivio įgula skrenda pagal padėtį, kurią vaizduoja komandų simboliai. Kai orlaivis pasiekia reikiamą aukštį, kompiuteris sukuria skridimo žemyn komandą. Orlaivio įgula laipsniškai mažina orlaivio polinkį iki tol, kol pasiekiamas reikiamas skrydžio lygis. Jei esminės informacijos įvedimas nepavyksta, tai parodoma įgulai raudonomis žymomis, kurios lengvai atpažįstamos pagal tam tikrą tekstą:

GS žyma atsiranda virš tūptinės skalės, jei signalas nutrūksta arba yra pakankamai slopinamas.

GYRO žyma atsiranda, jei nepavyksta orlaivio padėties informacijos įvedimas.

COMPUTERŠi žyma atsiranda, jei sistema aptinka gedimą išvedimo prietaisuose ar komandų signaluose.

Horizontaliosios situacijos monitoriaus (HSI) skrydžio valdymo komandos. Tipiniame prietaise (2.3.19 pav.) vyrauja kompasas, kuris valdomas iš kurso informacijos sistemos (RIC ar IRS).



2.3.19 pav. Horizontaliosios situacijos monitorius (HSI)

Vaizduoklio centre yra fiksuotas orlaivio simbolis, o kompaso rato viduje – simboliai, kurie žymi šalutinius valdymo signalus, tokius kaip ADI monitoriuje. Simbolika yra tokia:

– kurso rodyklė, pritaikyta fiksuoti kurso nustatymo rankenėle;
– kurso nuokrypio juostelė, valdoma signalų iš **VOR/LOC** imtuvo;
– kurso nuokrypio skalė, kurioje kiekvienas brūkšnelis reiškia 1° poslinkį nuo pasirinkto kurso ar švyturio duomenų;

– **Į/IŠ** žymos, kurios nurodo, ar pasirinktas kursas tęsiasi į (iš) VOR, kurios dingsta, kai parenkamas švyturio dažnis;
– **R-NAV** režime kiekvienas brūkšnys reiškia **1NM** išstūmimą, bet **R-NAV APR** režime skalė keičiasi taip, kad kiekvienas brūkšnys reiškia **1/4 NM**.

Į kairę nuo indikatoriaus yra tūptinės skalė, kuri kopijuoja tūptinės požymius ADI ir pateikia skaitmenine išraiška. Skaitmeninė atstumo reikšmė gaunama iš DME, kai įgula parenka kursą. Pasirinktiems tikslams orlaivio įgula taip pat gali rankiniu būdu parinkti kursą, kuris tiesiogiai pritaikys kurso poziciją kompase.

Įspėjimo žymos ant HSI, kaip ir ADI, yra raudonos ir atpažįstamos pagal tokį tekstą:
GS. Ši žyma atsiranda ir uždengia bet kokią tūptinės indikaciją, jei tūptinės signalas nutrūksta.
COMPASS. Žyma atsiranda, jei sutrinka kurso informacija.
VOR/LOC. Žyma atsiranda, jei sutrinka VOR ar švyturio signalai.

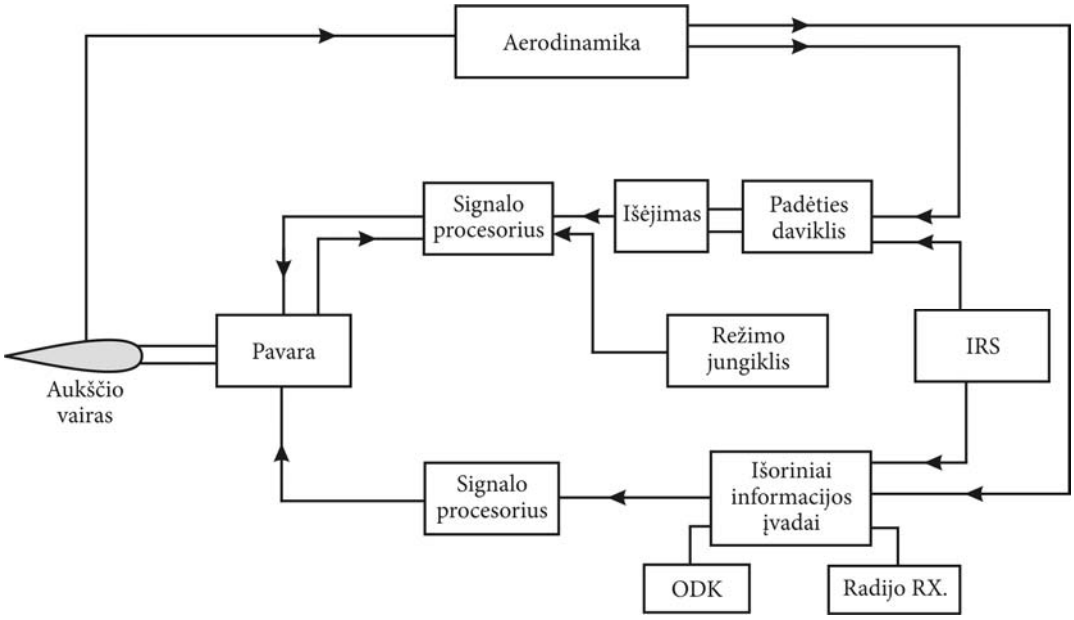
2.4. Automatinė skrydžio valdymo sistema (AFCS)

Automatinė skrydžio valdymo sistema (AFCS) yra kompleksinė sistema, sukurta siekiant sumažinti įgulai darbo krūvį, susikoncentruoti į skrydžio valdymo stebėjimą ir kontrolę. AFCS aprūpina pilotus šiomis funkcinėmis galimybėmis:

Stabilumo ir valdymo didinimas. Šios dvi funkcijos yra tarpusavyje susietos ir vienodai svarbios, valdant orlaivį rankiniu būdu ar automatiškai. Orlaivio skrydžio stabilumas ir valdumas turi būti optimaliai suderinti, o AFCS paskirtis – tai užtikrinti.

Orlaivio padėties palaikymas. Ši AFCS funkcija užtikrina orlaivio padėties valdymą pasirinktose ašyse.

Skrydžio valdymas. Vykdydama šią funkciją, AFCS reaguoja į išorinių informacijos šaltinių įvadų parametrus, tokius kaip aukštis, greitis, skrydžio kryptis ir kitus navigacinius duomenis. Kai skrendama šiuo režimu, autopilotas išlaiko nustatytas skrydžio sąlygas, bet reaguoja į skrydžio profilio pokyčius (pvz.: kelio valdymas, automatinis artėjimas, blyksėjimas ir tūpimas), gaunamus iš išorinių šaltinių. Šie išoriniai šaltiniai nėra AFCS dalis, tačiau jei norima efektyvaus sistemos darbo, turi būti su ja suderinti. 2.4.1 pav. pavaizduota tiekiamos į AFCS informacijos schema.



2.4.1 pav. AFSC sistemos aprūpinimo informacija struktūrinė schema

2.4.1. AFCS klasifikacija

AFCS kompleksiško panaudojimo orlaivyje laipsnis priklauso nuo:

– orlaivio dydžio;
– orlaivio amžiaus;
– skrydžių nuotolių;
– numatomų skrydžio maršrutų struktūros;
– orlaivio kompleksiškumo;
– įgulos narių skaičiaus;
– prieinamos kainos;
– siekiamo saugumo.

Atsižvelgiant į orlaivio valdymo trimatėje koordinačių sistemoje ašių skaičių, AFCS skirstoma į:

Vienos ašies. Šio tipo autopilotas kontroliuoja orlaivio polinkio ašies padėtį, horizontalumui valdyti naudoja eleronus.

Dviejų ašių. Šio tipo autopilotas kontroliuoja orlaivio polinkio ir posvyrio ašių padėtį, naudojant eleronus ir aukščio vairą. Stabilumo palaikymas šių ašių atžvilgiu yra pagrindinė autopiloto funkcija. Be to, toks autopilotas gali būti naudojamas skrydžiui valdyti, kaip informacijos šaltinis, leidžiant jam vykdyti rankiniu ar automatiniu būdu pakeistą skrydžio maršrutą.

Trijų ašių. Šio tipo autopilotas kontroliuoja orlaivio polinkio, posvyrio ir pokrypio ašių padėtį, naudojant eleronus bei aukščio ir posūkio vairus. Paprastai visa tai susieta su skrydžio valdymu ir galimybe valdyti automatinį orlaivio tūpimą.

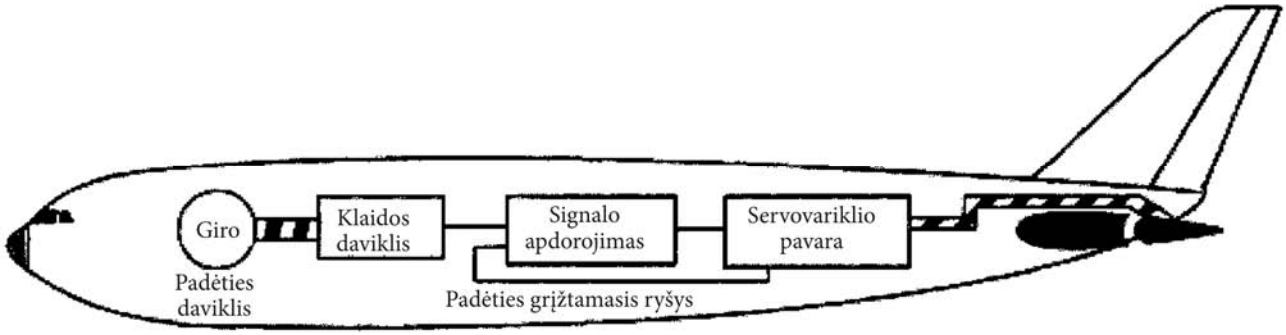
2.4.2. Sistemos valdymo kanalai

AFCS sistemos valdymo kanalai, kontroliuojantys orlaivio judesius trimatėje koordinačių sistemoje, vadinami taip:

– posvyrio kanalas;
– polinkio kanalas;
– pokrypio kanalas.

Vidinė valdymo (stabilizacijos) grandis

Kiekvienos koordinacinės ašies kontrolės kanalas veikia tuo pačiu principu, todėl pakanka panagrinėti tik vieną, pavyzdžiui, orlaivio polinkio valdymo kanalą. Vienos ašies polinkio kontrolės kanalo dedamosios parodytos 2.4.2 pav.



2.4.2 pav. Orlaivio polinkio kontrolės kanalo valdymo struktūra

Kartu valdymo kanalo sudėtinės dalys sudaro ***uždarąją valdymo sistemos grandinę,*** arba ***vidinę stabilizacijos sistemos grandį***. Šios grandinės elementų funkcijos yra šios:

Orlaivio padėties daviklis

Fiksuoja orlaivio padėties pokyčius apie susijusias ašis pagal giroskopinių padėties daviklių ir akcelerometrų duomenis.

Klaidos daviklis

Keičia per sinchronines duomenų perdavimo grandines gaunamą, padėties signalą į elektrinį klaidos signalą.

Signalo apdorojimas

Elektriniai klaidos signalai atpažįstami, stiprinami ir tiekiami į servovariklio pavarą.

Servovariklio pavara

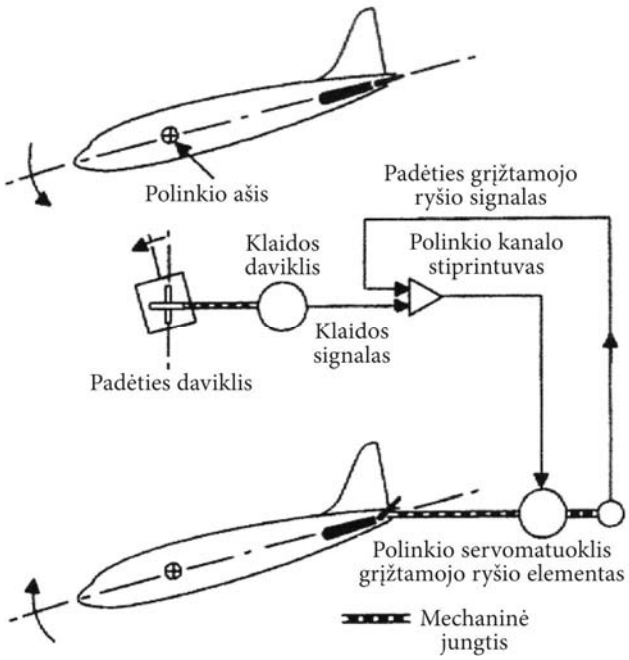
Keičia valdomojo paviršiaus padėtį.

Padėties grįžtamasis ryšys

Šis elementas perduoda signalo apdorojimo elementui informaciją apie bet kokį valdomojo paviršiaus padėties pokytį.

2.4.3. Polinkio stabilizavimo sistemos vidinės grandinės veikimas

Esant normaliam veikimui, autopiloto sistema palaiko nustatytą orlaivio polinkį. Jei vis tik orlaivio polinkis pasikeičia dėl kokių nors priežasčių, kaip pavyzdžiui, dėl aerodinaminių poveikių ar dėl išsiderinimo, tai į procesorių siunčiamas elektrinis polinkio klaidos signalas. Klaidos signalas apdorojamas ir pagal užklausimą nustatomas reikalingo lygio koreguojamasis valdantysis impulsas, tiekiamas į servovariklio apvijas. Tada servovariklis perstumia valdomąjį paviršių reikiamu dydžiu į reikiamą pusę. AFCS kompiuteris apdoroja signalą ir yra informuojamas apie kontroliuojamojo paviršiaus judesį per grįžtamąjį kontūrą (2.4.3 pav.).

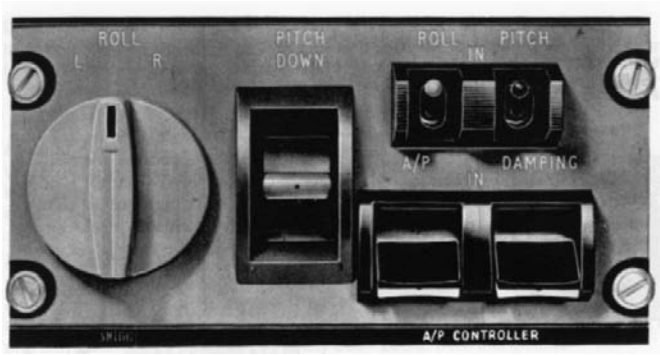


2.4.3 pav. Polinkio valdymo kinetinė schema

Grįžtamieji padėties signalai sustiprinami ir gaunamas signalas, priešingas klaidos signalui. Kai orlaivis grįžta į normalią padėtį, aerodinaminis grįžtamasis signalas pastoviai mažina padėties klaidos signalą ir padėties grįžtamasis signalas ima dominuoti, taip atstatydamas aukščio vairą į jo normalią padėtį.

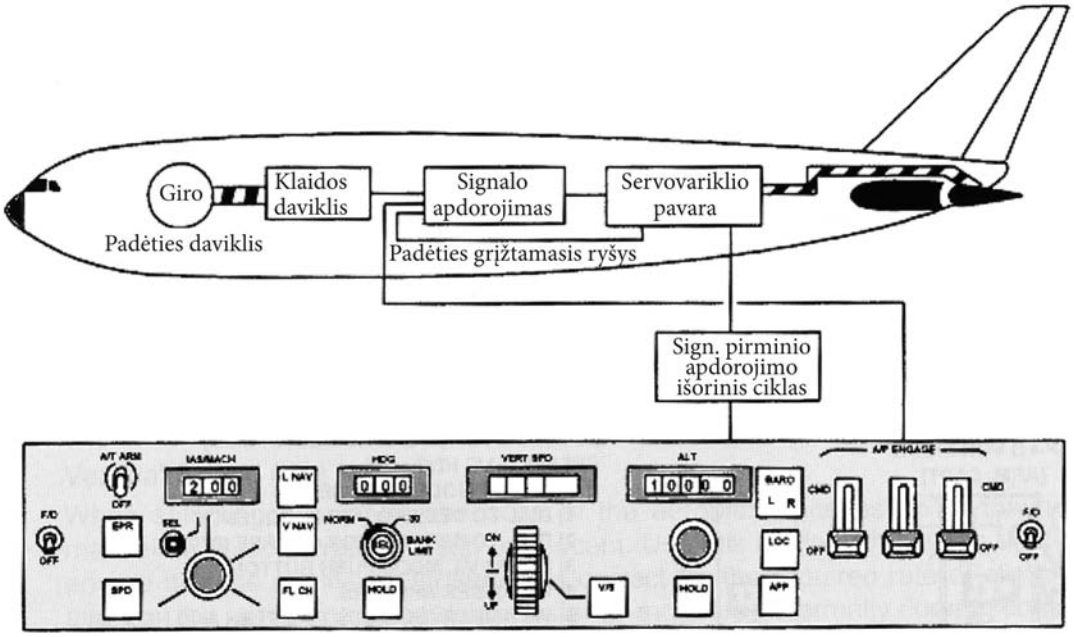
Išorinės grandinės kontrolė. Pirminė autopiloto funkcija yra stabilumas, pasiekiamas kontroliuojant vidinę grandinę, tačiau tiekiama pirminės informacijos signalus (skrydžio kryptis, orinis greitis, aukštis, radijo ryšys, horizontalioji navigacija, vertikalioji navigacija) į vidinę grandinę, sistema gali atlikti ir kitas užduotis. Įgula per atitinkamo režimo pasirinkimo skydą pasirenka šių informacijos šaltinių įvadinius duomenis, vadinamus išorinės grandinės kontrole. Pavyzdžiui, lengvame dviejų variklių orlaivyje posvyrio

ar polinkio komandos įvedamos rankiniu būdu per padėties valdymo režimų įrenginį (MCU), kaip parodyta 2.4.4 pav. Kai šie valdikliai aktyvuojami, sinchronizatoriaus siųstuvo rotorius arba potenciometras tiekia tam tikrą komandą į kanalo servovariklį.



2.4.4 pav. Padėties režimų valdymo įrenginio MCU pultas

Naujesniuose reaktyviniuose orlaiviuose išorinės grandinės signalai į sistemą perduodami per funkcionalesnę padėties režimų valdymo panelę (MCP), kaip parodyta 2.4.5 pav.



2.4.5 pav. Kompleksinis orlaivio padėties režimų valdymo skydas

Šie išorinės grandinės signalai sugrupuoti pagal posvyrio ar polinkio kategorijas priklausomai nuo jų funkcijos.

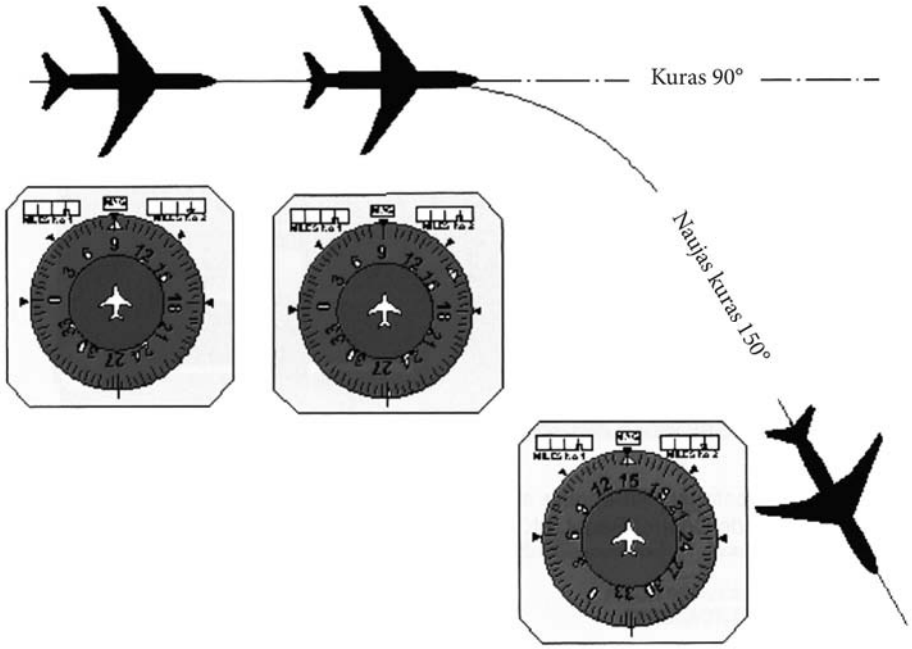
Posvyrio režimai

Kurso palaikymo. Kai įjungiamas šis režimas, autopilotas užuot priimęs kurso palaikymo klaidos signalus iš nuotolinio kompaso (RIC) ar inercinės duomenų sistemos (IRS), valdo posvyrio kampą, kad palaikytų autopiloto įjungimo metu nepakitusią buvusią orlaivio kryptį.

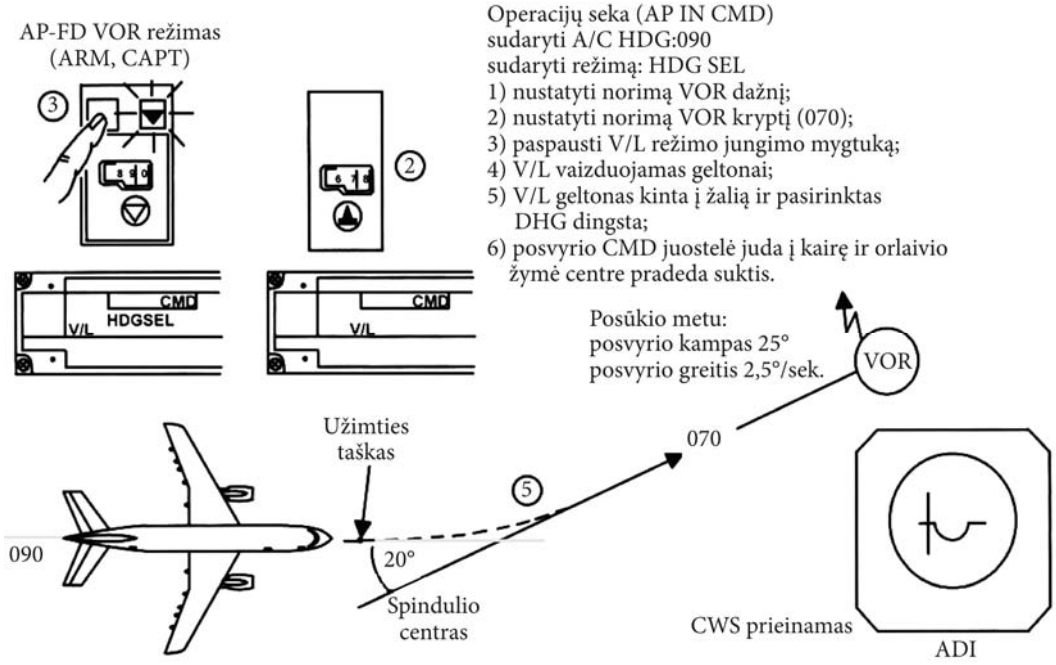
Kurso parinkimo. Kai įjungiamas šis režimas, orlaivis pasukamas į kryptį, pagal automatiniu ar rankiniu būdu įvestą judantį krypties žymeklį. 2.4.6 pav. rodo, kaip orlaivis reaguoja į kurso pokytį iš 90° į 150°.

VOR/Vietos užėmimas. Aukštųjų dažnių diapazono (VHF) navigacinis įrenginys priima VOR radialų ir vietos signalus. Orlaivis yra valdomas radijo švyturio krypties parinkimo režime, kol vadinamasis horizontalaus švyturio sensorius patikrina signalo stiprumą ir inicijuoja priėmimą nustatytam signalo stipriui (2.4.7 pav.).

Horizontalioji navigacija (LNAV). Šiame režime skrydžio valdymo sistema (FMS) nustatyto maršruto informaciją perduoda į autopilotą, kuris veda orlaivį pagal pasirinktą kelią.



2.4.6 pav. Orlaivio reakcijos į kurso pokyčio komandą schema

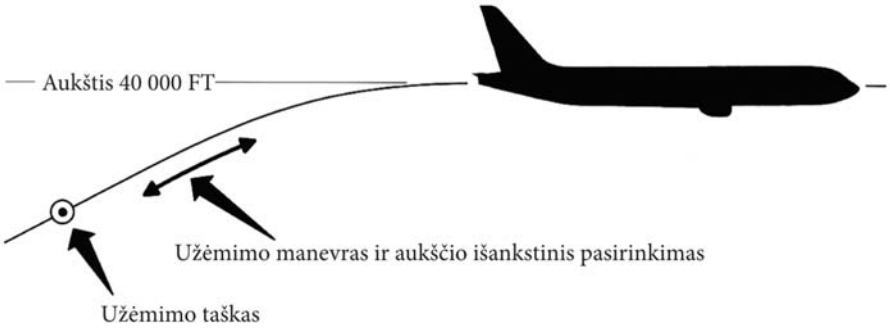


2.4.7 pav. VOR užėmimo režimas

Polinkio režimai

Aukščio išlaikymas. Kai įjungiamas šis režimas, orlaivis nustatyto laiko intervalo metu palaiko pasirinktą aukštį. Jei nukrypimai nuo pasirinkto aukščio tampa didesni nei numatyti (±200–300 pėdų), aukščio pokyčio perspėjimas praneša apie tai šviesos ir garso signalais.

Aukščio užėmimas (pakeitimas). Kai įjungiamas šis režimas, orlaivis užima pasirinktą aukštį aukštėjant ar žemėjant automatiškai išsilygindamas ir išlaiko šį aukštį. Aukščio užėmimo perspėjimas įsijungia, esant 1000–700 pėdų iki pasirinkto aukščio ir lieka įjungtas, kol iki to aukščio lieka 300–200 pėdų (2.4.8 pav.).



2.4.8 pav. Aukščio užėmimo režimas

Vertikalusis greitis. Kai pasirenkamas šis režimas, orlaivio nosis pakyla arba nusileidžia tiek, kad pasiektų pasirinktą aukštėjimo ar žemėjimo greitį. Šį režimą reikia naudoti atsargiai. Būtina įsitikinti, kad teisingai parinktas variklių traukos režimas nustatytam aukštėjimui ar žemėjimui ir kad orlaivio greitis yra nuolatos stebimas, paprastai tai susieta su automatine traukos valdymo sistema.

Tūptinė. Kai artėjimo tūpti metu parenkamas režimas „tūptinė“, autopilotas reaguoja į tūptinės švyturius ir suka orlaivį žemyn KTT slenksčio link.

Vertikalioji navigacija (V-NAV). Kai pasirenkamas šis režimas, kaip ir horizontaliojoje navigacijoje, orlaivis skraidinamas pagal įvestą maršrutą tik vertikaliojoje plokštumoje. Vertikalioji navigacija gali prisijungti prie autopiloto ir automatinės traukos sistemos.

Skrydžio lygio keitimas (FLCH) (greičio režimas). Šis režimas – tai orlaivio polinkio ir greičio susiejimas arba slėginis (manometrinis) susiejimas, kas leidžia autopilotui valdyti aukštėjimą ar žemėjimą pasirinktu greičiu į pasirinktą aukštį ir gali būti apibūdinamas indikatorinių (prietaiso) orinio orlaivio greičiu arba Macho skaičiumi. Šis režimas reikalauja informacijos apie išorinės atmosferos slėgį, kuri paprastai gaunama iš oro duomenų kompiuterio (ADC).

Mišrieji posvyrio ir polinkio režimai

Antrasis ratas. Per automatinį artėjimą skrydžio įgula gali pasirinkti atšaukti tupdymą ir aukštėti. Priklausomai nuo orlaivio tipo „Antrojo rato“ režimas gali būti vykdomas skrydžio vadovo ir (arba) autopiloto. Šis režimas veikia tik tada, kai yra įjungtas automatinio artėjimo režimas ir kai tuo pat metu įjungiami kilimo ir antrojo rato jungikliai (TOGA), esantys ant greičio rankenos, ir (arba) nustumiant greičio svirtis į priekį iki pat galo. Kai paspaudžiami kilimo ir antrojo rato jungikliai, automatiškai padidinamas greitis ir orlaivis pakyla didžiausiu saugiu greičiu.

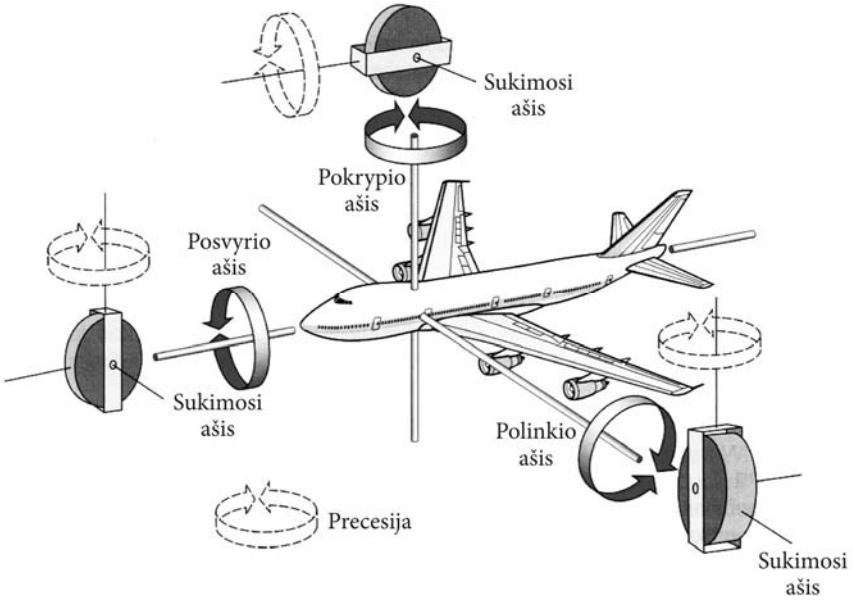
Šturvalo sukimas (CWS). Jei parenkamas šis režimas, skrydžio įgula gali kontroliuoti orlaivio posvyrį ir polinkį, naudodama įprastas valdymo priemones. Kai šturvalas juda, orlaivis pasiekia naują aukštį, ir kai paleidžiami vairai, jis tą aukštį išlaiko. Šiame režime jėgos keitikliai aptinka suteiktas posvyrio ir polinkio jėgas. Šie keitikliai įmontuoti į šturvalo kolonėlę. Tai gali būti pjezoelementai, keičiantys elektrinio signalo dydį (pasipriešinimą), esant skirtingam spaudimui į jį. Generuojami signalai, kurių lygis proporcingas suteiktai jėgai, sustiprinami ir tiekiami į reikiamą valdymo kanalą, kur aktyvuojamas gautam signalui proporcingas valdymas.

Šturvalo valdymo rankenos jungiklio paspaudimas (TWS). Jei parenkame šį režimą TWS jungiklio paspaudimu, laikinai išlaisvinami tam tikri valdymo kanalai ir įsijungia servovaldymas. Tada skrydžio įgula gali rankiniu būdu pakeisti aukštį ar kryptį. Kai tik TWS jungiklis atleidžiamas autopilotas automatiškai priima ir išlaiko parinktą aukštį ir kryptį.

Turbulencijos skverbimasis. Didelės konstrukcinės apkrovos gali atsirasti skrendant tokiomis sąlygomis, kai veikia turbulencija. Esant šioms sąlygoms normalu išjungti autopilotą ir valdyti orlaivį rankiniu būdu. Kai kuriuose orlaiviuose gali būti įjungiamas turbulencijos skverbimosi režimas, kuris sumažina apkrovos didėjimą polinkio bei posvyrio kanalams ir sušvelnina AFCS reagavimą į turbulenciją.

Padėties jutimas

Tai atliekama, naudojant vertikaliosios ašies (dviejų laisvumo laipsnių) poslinkio giroskopus, kurie yra įtaisomi (2.4.9 pav.) išilgai kiekvienos orlaivio ašies.



2.4.9 pav. Giroskopų panaudojimas orlaivio padėčiai nustatyti

Tempo giroskopas. Šio giroskopo ašis nukreipiama statmenai išilginei orlaivio ašiai ir vadinama pokrypio ašimi. Tempo giroskopas nustato bet kokį orlaivio sukimąsi apie šią ašį ir jo greitį.

Padėties giroskopas. Orlaivio padėtis yra stebima vertikalo giroskopu (VG). Kai nustatinėjama orlaivio padėtis, sistemos procesorius apskaičiuoja padėties magnetinius nuokrypius ir nustato reikalingą pataisos valdymo signalą padėčiai kompensuoti. Vertikaliosios padėties „standartas“ gali būti imamas pagal integruotojo giroskopo padėtį arba kaip alternatyva iš nepriklausomo šaltinio, tokio kaip nuotolinis vertikaliojo standarto įrenginys (VRU), INS arba IRS. Daugelyje sistemų korekcijos signalas sudaromas iš abiejų – dydžio ir padėties signalų. Tai sumažina delsimo laiką, apskaičiuojant šį dydį ir tendenciją pervertinti korekciją, kas yra šių sistemų pagrindinė problema.

Posvyrio ir polinkio kanalai paprastai yra valdomi VRU, bet pokrypio kanalas reikalauja papildomo signalo iš aviahorizonto.

AFCS kompiuteris (signalų procesorius)

Šio funkcinio mazgo paskirtis: apdoroti orlaivio padėties signalą ir apskaičiuoti valdymo judesio pobūdį bei dydį, reikalingą reakcijai į esamą į padėtį. Jis taip pat turi stebėti grįžtamąjį ryšį, kad galėtų užtikrinti, jog veikia reikama kontrolė ir atsiranda laukiamas efektas.

Skaičiavimai yra pakankamai paprasti, tačiau labai komplikuoti. Kompiuteryje atliekami šie skaičiavimai ir procesai:

Stiprinimas. Aptikto signalo stiprinimas iki pakankamai aukšto lygio, kuris veiktų kaip išėjimo signalas.

Sudėtis / atimtis. Tai matematiniai veiksmai, kurie naudojami norint gauti tokią informaciją, kaip padėties pokytis, atitinkantis posūkio dydį, arba atvirkščiai.

Ribojimas. Tai procedūra, draudžianti bet kokio parametro pokytį nuo tam tikros ribos.

Formavimas. Tai procedūra, kurios metu kompiuterio išėjimo, orlaivio valdymo signalai keičiami taip, kad būtų pasiektas reikiamas skrydžio maršrutas arba jo valdymo charakteristikos.

Programavimas. Tai individualus procesas, skirtas nustatytiems orlaivio manevrams sekti ir informuoti įgulą.

Kompiuterio galia kinta priklausomai nuo jo paskirties ir sudėtingumo. Atliekant visus skaičiavimus naudojami valdymo dėsniai, nuo kurių priklauso, kaip tiksliai valdymo reikalavimai yra keičiami į valdymo veiksmus. C valdymo dėsnis, pavyzdžiui, dažniausiai naudojamas dideliuose transportiniuose orlaiviuose posvyrio ašiai valdyti. Šis dėsnis turi užtikrinti orlaivio stabilumą pasirinktam skrydžio kelio kampui, kompensuojant su skridimu mažais greičiais susijusias problemas.

Panašūs skaičiavimai taip pat apima oro srauto apkrovų orlaiviui nustatymą, atliekant manevrus. Šios apkrovos yra orlaivio orinio greičio funkcija (dinaminis slėgis), todėl reikalauja įėjimo signalo iš oro duomenų kompiuterio (ADC) ar kito dinaminio slėgio šaltinio. Senesniuose ar paprastesniuose autopilotuose nėra leidimų gūsių apkrovoms, kas gali vykti skrendant, esant turbulencijai. Jei tokios oro sąlygos pasitaiko skrendant orlaiviu su tokio tipo autopilotu, jis turi būti nedelsiant išjungtas, o orlaivis skraidinamas rankiniu būdu. Daug modernesniuose orlaiviuose su sudėtingesne valdymo sistema yra funkcinis jungiklis, sušvelninantis valdymo reikalavimus, leidžiant orlaiviui skristi esant oro srauto gūsių poveikiui. Tai pasiekiama padidinant argumentų ribas skaičiavimuose. Šis režimas turėtų būti įjungiamas tik tais atvejais, kai skrendama turbulencijos sąlygomis, nes priešingu atveju autopilotas tampa ne toks jautrus.

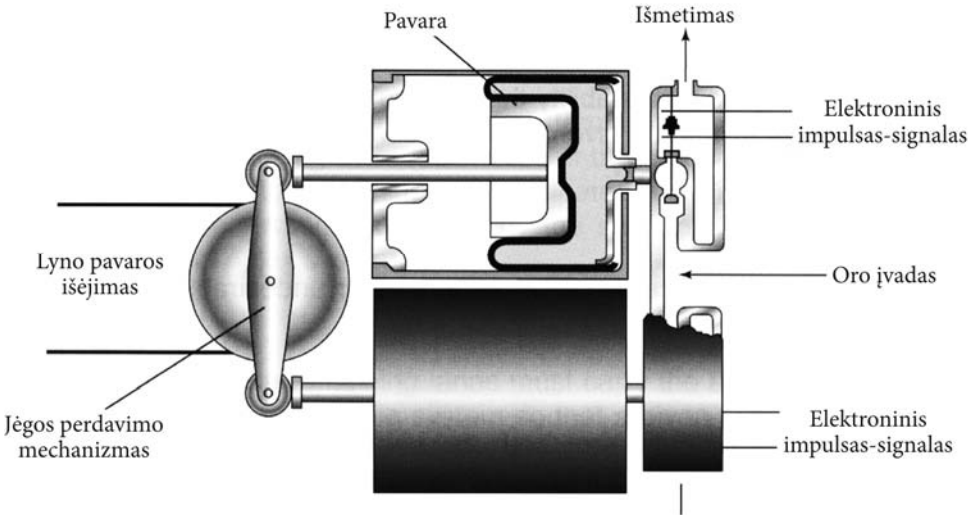
Servovariklio pavara

Yra keletas pavaros tipų, tačiau jų realizavimas turi užtikrinti balansą tarp valdomojo paviršiaus judesio greičio ir jo dydžio (tais atvejais, kai atsiranda klaidų), normalaus judėjimo kiekio ir bet kokio kontrolės ir (ar) stabilumo judėjimo didumo bei tikslumo.

Elektromechaninė pavara. Ji gali būti maitinama nuolatine ar kintamaja srove. Nuolatinės srovės maitinimo atveju pavaros variklis susiejamas su skrydžio valdymo sistema per elektromagnetinę sankabą ir mechaninę jungtį. Reikamo grįžtamojo ryšio srovė gaunama iš pavaros varikliu valdomo kintamojo varžo šliaužiklio. Kintamosios srovės maitinimo atveju vykdomasis pavaros variklis gali būti dviejų fazių indukcinio tipo. Transmisijos sinchronizacijos sistema suteikia informaciją apie valdomojo paviršiaus padėtį, kol tachogeneratorius tiekia į signalų procesorių reikalingą grįžtamąją srovę.

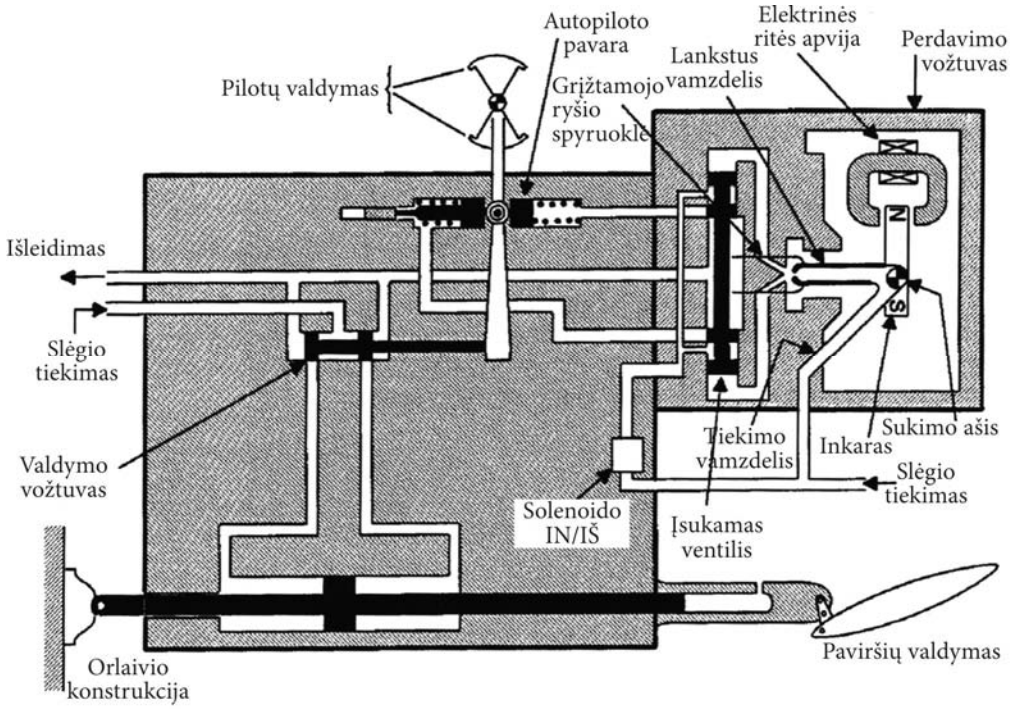
Elektropneumatinė pavara. Tipinė šio tipo pavara yra parodyta 2.4.10 pav., kurioje pneumatinius vožtuvus elektromechaniniu būdu valdo signalai iš AFCS kompiuterio.

Reikalingas energijos šaltinis yra pneumatinis maitinimas, tiekiamas iš variklio varomos pompos arba tiekiant suslėgtąjį orą iš reaktyvinio variklio kompresoriaus. Kai gaunamas valdymo signalas, vieno vožtuvo atsidarymas padidėja, o kito – sumažėja. Taip sukuriamas diferencinis slėgis dviejuose cilindruose ir gaunamas dviejų traukių diferencinis judesys, kurios besisukdamos verčia suktis reikiamą valdymo judesį atliekančią išorinę jungtį.



2.4.10 pav. Elektropneumatinės pavaros struktūra

Elektrohidraulinė pavara. Pačiuose moderniausiuose transporto orlaiviuose pirminis skrydžio valdymas vyksta per srauto valdymo įrenginį (PCU), kaip parodyta 2.4.11 pav., kur panaudojama hidraulinės jėgos galia aktyvuoti valdomąjį paviršių. Šie įrenginiai tiesiogiai pavaldūs AFCS kompiuteriui ir nereikalauja nepriklausomos servopavaros. Signalas iš AFCS kompiuterio teikiamas į solenoidą, kuris valdo perdavimo vožtuvą per hidraulinę sistemą. Taip pakreipiamas kontroliuojamas paviršius, o apie jo padėtį grįžtamąja grandine pranešama kompiuteriui.



2.4.11 pav. Elektrohidraulinės pavaros struktūra

2.4.4. Autopiloto terminologija

Kita terminologija yra susieta su kompleksine moderniąja autopiloto sistema:

Greičio slopinimo sistemos. Šios sistemos daugiau veikia stabilizavimą nei valdymą. Jos nesugrąžina orlaivio į konkretų aukštį, bet apsaugo nuo nepageidaujamo nukrypimų atsiradimo ir sušvelnina skrydžio įgulos padarytus neteisingus pokyčius.

Sisteminė apsauga. Sistemos preventyvi valdomųjų paviršių apsauga nuo nuklydimo ar kito nepageidaujamo sutrikimo, ribojant pavaros veiką.

Lygintojai. Šie prietaisai išlygina išėjimo signalus iš daviklių ir pavarų. Jei užfiksuojamas padėties pokytis yra tos pačios krypties kaip ir pavaros, tai lygintuvas automatiškai atjungia grandinę.

Greičio trigerinės sistemos. Orlaiviui įsibėgėjant gaunamos charakteristikos yra visiškai kitokios nuo tikėtinų, esant normaliam skrydžiui. Ši sistema automatiškai atjungia autopilotą, jei greitis viršija nustatytą slenkstį.

Vienpusė sistema. Tai atskira automatinė valdymo sistema, sujungta su keletu žemesnio lygio kanalų. Kai kurios sistemos dedamosios gali būti sudubliuotos, tačiau vienintelė klaida paverčia sistemą neveikiančia. Ši sistema dar vadinama paviene sistema be apsaugos.

Daugialypės sistemos. Šias sistemas sudaro dvi ar daugiau pavienių sistemų ir žemesniojo lygio kanalų, t. y. tokių, kad, esant sistemos klaidai, likusios sistemos dalys galėtų atlikti valdymo funkcijas. Sistemos grupuojamos pagal sistemų ir žemesniojo lygio kanalų skaičių į dvigubas, trigubas ar net keturgubas.

Dvigubos sistemos. Šios sistemos sujungia dvi pilnas valdymo sistemos linijas kiekvienam kanalui. Jos naudojasi nepriklausomais (atskirais) sensoriais, kompiuteriais, pavaromis ir pavarų maitinimo šaltiniais. Dvi valdymo sistemos sujungtos su tais pačiais kontroliuojamais paviršiais ir, orlaiviui įsibėgėjant, viena linija valdo, o kita fiksuoja nukrypimus ir juos pataiso pavaros signalu. Šios sistemos atsako greitis (įsibė-

gėjimui) gali būti padidintas, naudojant lyginimo sistemą, kuri nuolatos stebi atskirų pavarų padėtis ir, jei pastebi vienos iš jų paklaidą, ją atjungia. Ši sistema dar vadinama vienguba klaidos išvengimo sistema.

Trigubos sistemos. Šios sistemos yra dvigubų sistemų vystymas ir vietoj dviejų kanalų turi tris kanalus kiekvienai valdymo linijai. Nuolatos stebimos visos trys linijos ir lygintojas pritaikytas aptikti nukrypimą bet kurioje valdymo linijoje. Tokiu atveju įvyksta sprendimas, kuri linija klysta ir ji užblokuojama, paliekant sistemą dviguba.

Keturgubos sistemos. Šios sistemos naudoja keturias linijas, kiekvienam valdymo kanalui ir taip suteikia papildomą klaidų apsaugą.

Formavimo sekimas. Ši sistema naudojama su kita sistema, tokia kaip dviguba sistema, anksčiau suprogramuotoms AFCS kompiuteryje skrydžio charakteristikoms taisyti. Kompiuteris lygina informaciją, reikalingą turimam valdymo parametrui nustatyti, su atsaku, gaunamu iš grįžtamojo ryšio daviklių. Tai efektyviai dvigubai sistemai suteikia trigubos sistemos savybių.

Automatinis augimo kitimas. Kai išjungiama kuri nors valdymo linija, likusių valdymo linijų veiksmingumas turi atitinkamai didėti. Tai pasiekiama automatiškai reguliuojant sistemos galią taip, kad didesnį disbalansą atitiktų didesnė pataisos judesio amplitudė arba likusios valdymo pavaros judesio greitis.

Stebėjimas. Šis terminas vartotinas daugiapakopėse sistemose, kur atliekami palyginimai tarp dviejų ar daugiau išėjimų (įėjimų) ar tarp išėjimo (įėjimo) ir parinktų duomenų. Jei palyginamos reikšmės viršija nustatytąsias – sistema automatiškai atsijungia.

Dvigubo stebėjimo. Ši sąvoka tinkama sistemoms, sudarytoms iš dviejų sistemų, kurios turi atskirus srovės šaltinius ir veikia lygiagrečiai. Sistemos yra save stebinčios arba išėjimus tikrina lygiagrečioji lygintuvo grandinė. Bet kuriuo momentu tik viena sistema yra aktyvi. Jei budinčioji sistema aptinka lygiagrečiojoje klaidą, automatiškai ją atjungia ir tampa aktyviąja sistema.

2.4.5. Mišrusis jungimas

Tai procesas, kai pokrypio judesys nustatomas, naudojant eleronus orlaivio posūkio metu, kuris tuo pat metu turi būti įskaičiuotas pridedant šiek tiek krypties vairo posūkio. Be to, viražo metu orlaivis turi pakitusį keliamosios jėgos vektorių, kuris nukreiptas žemesniojo sparno link taip, kad vertikalioji jo dedamoji yra kompensuojama. Visa tai turi būti aptinkama, didėjant orlaivio atakos kampui. Siekiant atlikti subalansuotąjį posūkį, pirminis veiksmas yra polinkio kanalo valdymo signalai, pridedami antriniai signalai iš posvyrio ir pokrypio kanalų. Dviejų ašių sistemoje posvyrio ir pokrypio kanalai paprastai veikia kartu, kad pasiektų reikiamą balansą.

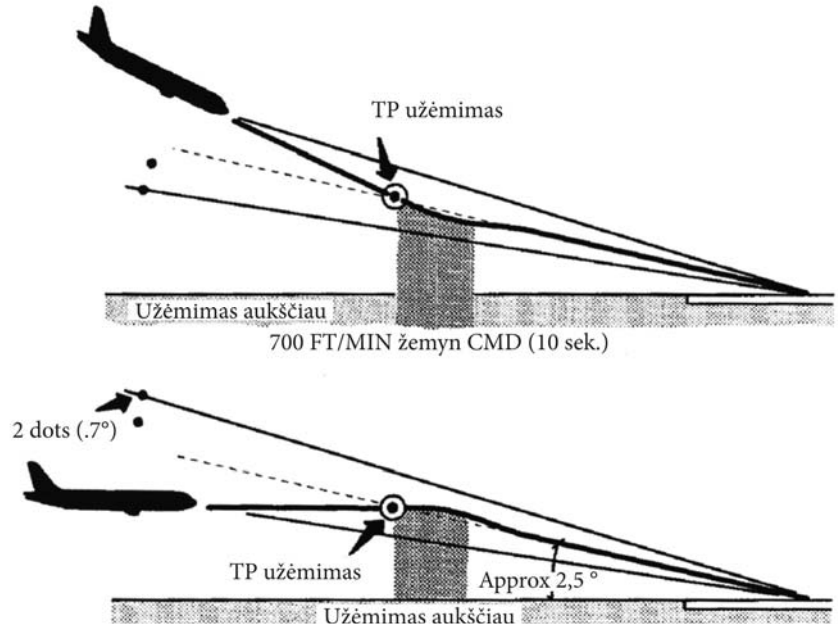
2.4.6. ILS jungimas

Orlaivio navigacinį imtuvą įjungus į specifinį būvimo vietos nustatymo režimą, orlaivis vedamas į leidimosi trajektoriją. Kai orlaivio būvimo vietos nustatymo signalai tampa pakankamai stiprūs, jie užimami ir tiekiami į autopilotą, kuris skraidina orlaivį artėjimui prie tako, kas paprastai atliekama dviem etapais (2.4.12 pav.):

pirma, orlaivis užima būvimo vietos nustatymo signalą, taip pat susiderina sklendimo trajektoriją. Parinkta kryptis ir būvimo vietos nustatymo signalai kartu leidžia autopilotui nukreipti orlaivį pagal pratęstą vidurinę tako liniją;

antra, orlaivis pagauna sklendimo trajektorijos švyturį ir autopilotas keičia polinkio padėtį taip, kad orlaivis skrenda žemyn valdomas pagal tūptinės švyturio duomenis.

Per automatinį artėjimą sukuriamos atstojamosios šoninio vėjo efektams, nes priešingu atveju orlaivis pasislinktų pavėjui nuo švyturio centro, kas reikštų orlaivio nukrypimą nuo tako lygiagrečiai su švyturiu. Papildomas signalas, atitinkantis orlaivio nuokrypos dydį, turi būti tiekiamas į autopilotą, kad pataisytų šoninio vėjo įtaką taip, kad orlaivis būvimo vietos nustatymo signalais išsilygiuotų į švyturį, kai bus kertama sklendimo trajektorija. Režimas, priešingas sklendimo kelio kirtimui, vadinamas padėties, aukščio, orinio greičio arba vertikaliojo greičio palaikymu, tačiau pasirinktas režimas automatiškai atšaukiamas, kai orlaivis pagauna sklendimo trajektoriją.

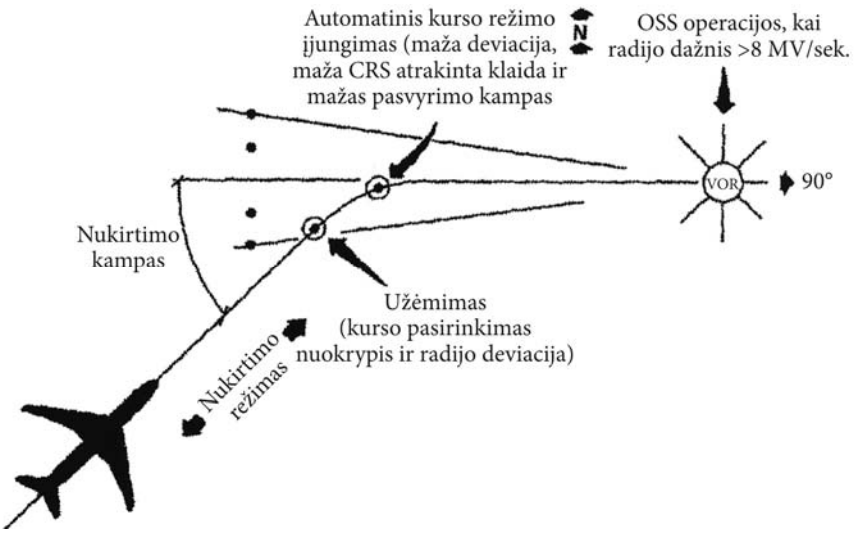


2.4.12 pav. Orlaivio tupdymo pagal ILS tūptinę schema

Kai vertikalusis švyturio sensorius aptinka, kad orlaivis artėja prie sklendimo trajektorijos švyturio centro, automatiškai paleidžiamas priėmimo režimas, nurodydamas autopilotui pasiekti vertikalų žemėjimą, lygų maždaug 700 pėdų per minutę. Po trumpo laiko tarpo (apytiksliai 10 sek.), per kurį sklendimo trajektorijos paklaidos signalas sumažėja iki nulio, sklendimo trajektorijos sekimo režimas įsijungia. Kai orlaivis artėja prie tako sklendimo trajektorijos ir būvimo vietos, nustatymo signalų švyturiai susilieja. Kad sumažėtų tikimybė orlaiviui įeiti į svyruojantį judesį, klaidos signalai susilpnėja taip, kaip radijo aukščiamačio atvirkštinė funkcija. Apie nuokrypas nuo švyturio, kai orlaivis artėja automatiškai, įgula informuojama švyturio nuokrypų šviesomis (lemputėmis) pulte arba per EADI vaizduoklį. Nuokrypos įspėjimas paprastai atvaizduojamas, kaip mirksintis būvimo vietos nustatymo signalų arba sklendimo trajektorijos indikatorius.

2.4.7. VOR jungimas

VOR jungimas yra panašus į būvimo vietos nustatymo signalų režimą, išskyrus tai, kad šiuo atveju VOR imamas, kai jį pasirenka platumos spindulio jutiklis. Kai orlaivis artėja prie pasirinkto radialo, autopilotas automatiškai jį užima, esant apytiksliai vieno taško (5°) nuokrypai (2.4.13 pav.).



2.4.13 pav. VOR užėmimo schema

Prieš užimant spindulį, orlaivis paprastai skrenda pasirinkta kryptimi arba kitu spindulio kirtimo režimu. Kai tik VOR priėmimo režimas prasideda, buvęs skrydžio režimas automatiškai baigiasi. Sekimas VOR radialu vyksta iki to momento, kai deviacijos, kurso nuokrypos ir orlaivio posvyrio signalai tampa lygūs nuliui.

Kai orlaivis priartėja prie VOR siųstuvo, jo klaidos signalas tampa nepastovus dėl švyturio ***„Spindulio konvergencijos“*** ir ***„Kūgio nevienalytiškumo“***. Siekiant to išvengti, orlaiviui priartėjus prie švyturio, kryptiškumo diagramos formavimo kūgio VOR signalas dažniausiai atjungiamas, ir tai atlieka daviklis OSS (*Over Station Sensor*), kuris automatiškai nutraukia VOR signalą tam tikram laiko intervalui, kol orlaivis praskrenda virš švyturio.

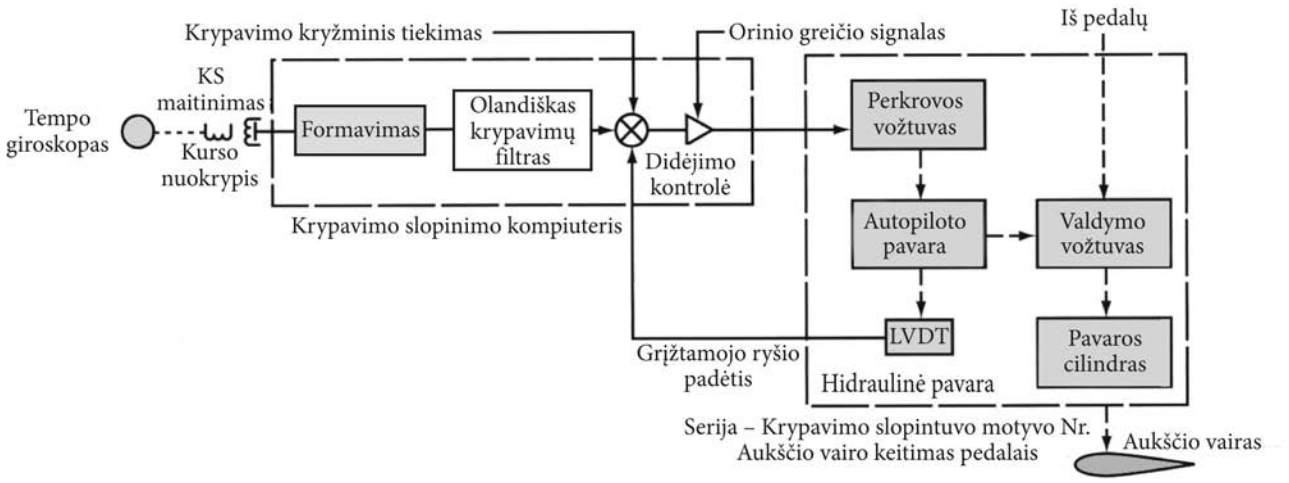
2.4.8. Stabilumo problemos

Dvi dažniausios pasitaikančios orlaivio stabilumo problemos, susietos su:

– **Olandų žingsnis**. Tai pokrypio ir svyravimo virpesiai, sukeliantys kartu orlaivio krypavimą ir siūbavimą į šonus. Šis judesys dažniausiai kyla orlaiviuose su didelio ploto sparnais ir, jei nenuslopinamas valdant orlaivį, veda prie katastrofos. Išvengti olandų žingsnio padeda krypavimų slopinimo sistema, kuri pritaikyta jausti labai mažas skrydžio kelio nuokrypas ir automatiškai tiekti kompensavimo signalus į krypties vairą.

– **Lenkimas žemyn**. Tai fenomenas, verčiantis orlaivį į pikiravimą, kylantis, skraidant viršgarsiniais greičiais. Skraidant tokiais greičiais, gali atsirasti orlaivio galinės dalies, esančios už orlaivio masių centro, vertikalusis kilimas. Šiam efektui kompensuoti, naudojama Macho trimeriavimo sistema (*Mach Trim System*).

Krypavimų slopinimas. Sistema reaguoja į ankstyvosios sukimosi judesio stadijos nuokrypas, esant tikimybei atsirasti olandų žingsniui. Ši sistema yra visiškai atskira nuo AFCS ir veikia autonomiškai. Žemiau parodyta jos tipinė sandara (2.4.14 pav.).



2.4.14 pav. Krypavimų slopinimo sistemos struktūra

Nuokrypų jutikliu tarnauja tempo giroskopas, sumontuotas pokrypio slopinimo įjungimo įrenginyje. Šiame įrenginyje yra pokrypio slopinimo grandinės kompiuteris, atliekantis šias funkcijas:

– filtruoja aptiktus klaidos signalus ir palygina juos su grįžtamaisiais signalais, prieš praleisdamas komandą kitai valdymo stadijai. Tai leidžia išvengti klaidų, kurios gali būti sukeltos orlaivio sklandmens lankstumo;

– filtruotus signalus palygina, suformuodamos servosignalo įėjimo poveikį;

– sustiprina poveikio servo signalą.

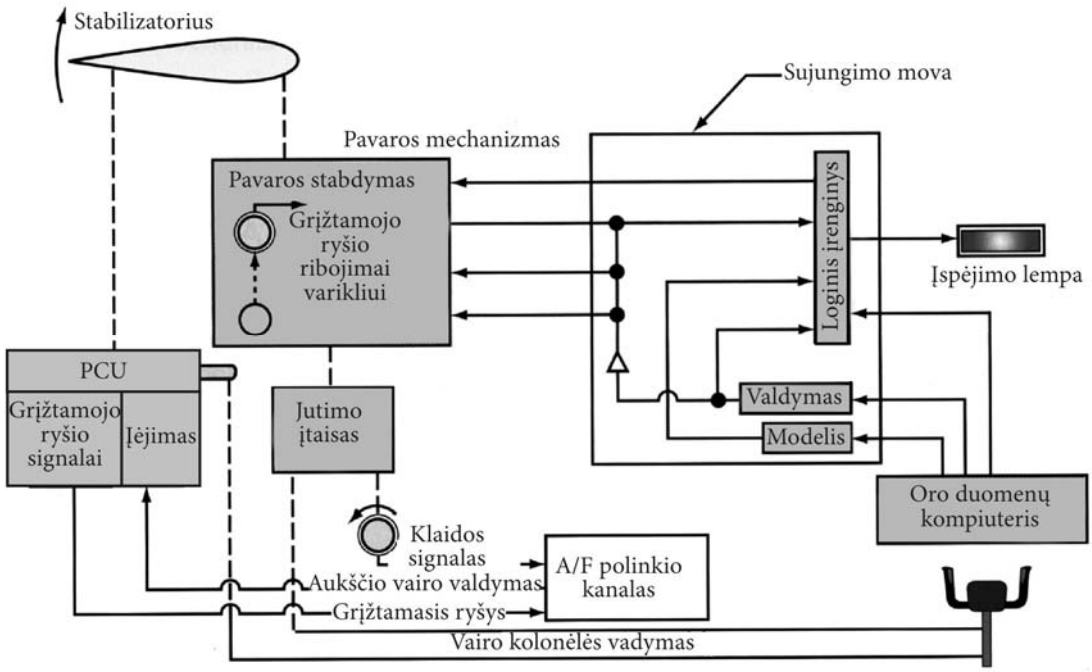
Sustiprintas servo signalas, tiekiamas per nuo įprastos AFCS pavaros nepriklausantį ***perkrovos vožtuvą*** ir nukreipia hidraulinį skystį su slėgiu į pokrypio slopintuvą krypties vairo pavaroje. Signalai iš pokrypio slopintuvo ir krypties vairo valdančiomis komandų sekomis arba lygiagrečiai veikia orlaivio krypties vairo valdymą. Valdant komandų seką, vairo pedalų judėjimo nėra. Kai kurios sistemos veikia nuosekliųjų

komandų serijomis ar lygiagrečiai priklausomai nuo skrydžio fazės. Esant kreiseriniam skrydžiui, sistemos veikia nuoseklių komandų serijomis, kadangi krypties vairų valdymas apribotas, bet per automatinio tupdimo fazes, kai reikalingas padidintas krypties vairo valdymas, sistemos valdymo būdas pasikeičia į lygiagretųjį. Grįžtamasis kontūras įmontuojamas taip, kad kai pokrypio judesys pasibaigia, krypties vairas automatiškai grįžta į normalią padėtį.

Pokrypio slopinimo signalas, atsirandantiems svyravimų greičiams, yra atvirkščiai proporcingas oriniam greičiui. Taigi reikalingas signalas iš oro duomenų kompiuterio (ADC). Pokrypio slopinimo signalai gali keistis, esant tam tikrai sistemos konfigūracijai. Jei tai reikalinga, signalas iš užsparnio padėties indikatoriaus grandinės tiekiamas į pokrypio slopinimo išėjimo stiprinimo grandinę, taip didindamas augantį išleistų užsparnių įtakos greitį.

Pokrypio slopinimo sistemos veikimas stebimas prietaisų skydelyje, kuris taip pat rodo krypties vairo padėtį. Įmontuotas grandinės tikrinimas simuliuoja pokrypio svyravimus, paduodamas sukimo momentus į tempo giroskopo daviklį. Pakeistas giroskopo sukimasis sukuria klaidos signalą, kuris pakeičia krypties vairo judesį ir veikia reles prietaisų skydelyje.

Macho trimeriavimo sistema. Ši sistema yra sujungta su posvyrio kanalu ir, analogiškai kaip ir krypavimo slopinimo sistema, nepriklauso nuo AFCS. Kitame puslapyje parodyta tipinė tokios sistemos schema (2.4.15 pav.).



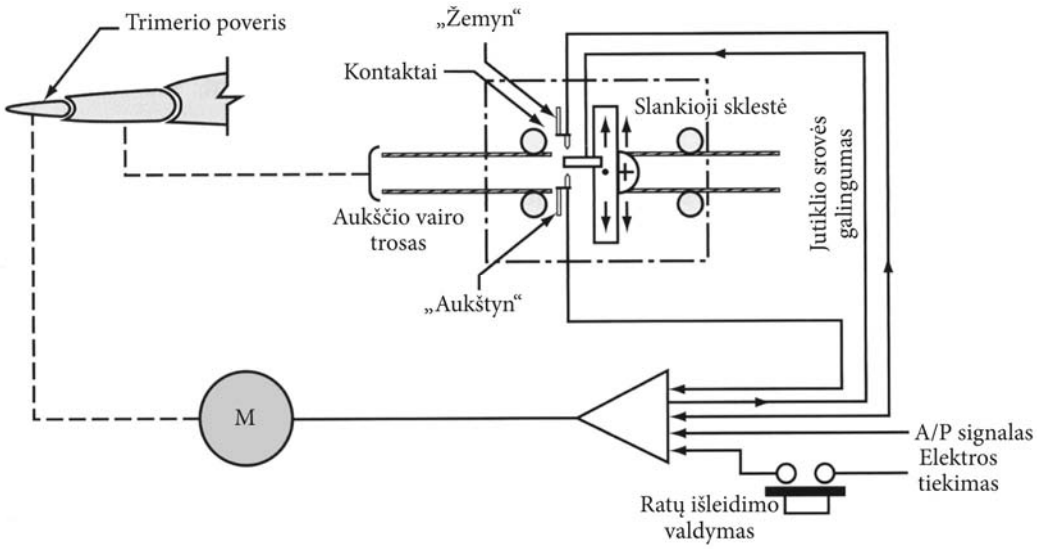
2.4.15 pav. Automatinis posvyrio trimerio valdymas

Sistemos pagrindas yra jungimo įrenginys, priimantis signalus, reaguojantis į Macho skaičių iš oro duomenų kompiuterio ADC. Jei šie signalai viršija nustatytas reikšmes (priklauso nuo orlaivio tipo), tai trimerio įjungimo įrenginys mažina orlaivio trauką, ir greičio signalas iš ADC veikia variklio traukos valdymą. Tai priverčia stabilizatorių judėti aukštyn ir reaguoti į bet kokią tendenciją, sukeliančią orlaivio galinės dalies virpesius. Ši sistema taip pat stebima įgulos prietaisų panelėje ir, jei sistema sutrinka, prietaisų skydelyje įsijungia klaidos indikatoriaus lemputė.

Automatinė trimerio kontrolė AFCS`e paprastai suteikiama apie posvyrio ašį ir turi būti aktyvuota, kai tik įjungiamas AFCS.

Trimerio kontrolės sistemos sandara priklauso nuo orlaivio tipo, čia bus aptarti tik du orlaivių tipai.

Mažas civilinės aviacijos dviejų variklių orlaivis. Šio tipo orlaivyje aukščio vairai veikia valdomi trosų sistema, kuri valdoma rankiniu arba elektroniniu būdu. Tipinė automatinė trimerio sistema parodyta 2.4.16 pav.

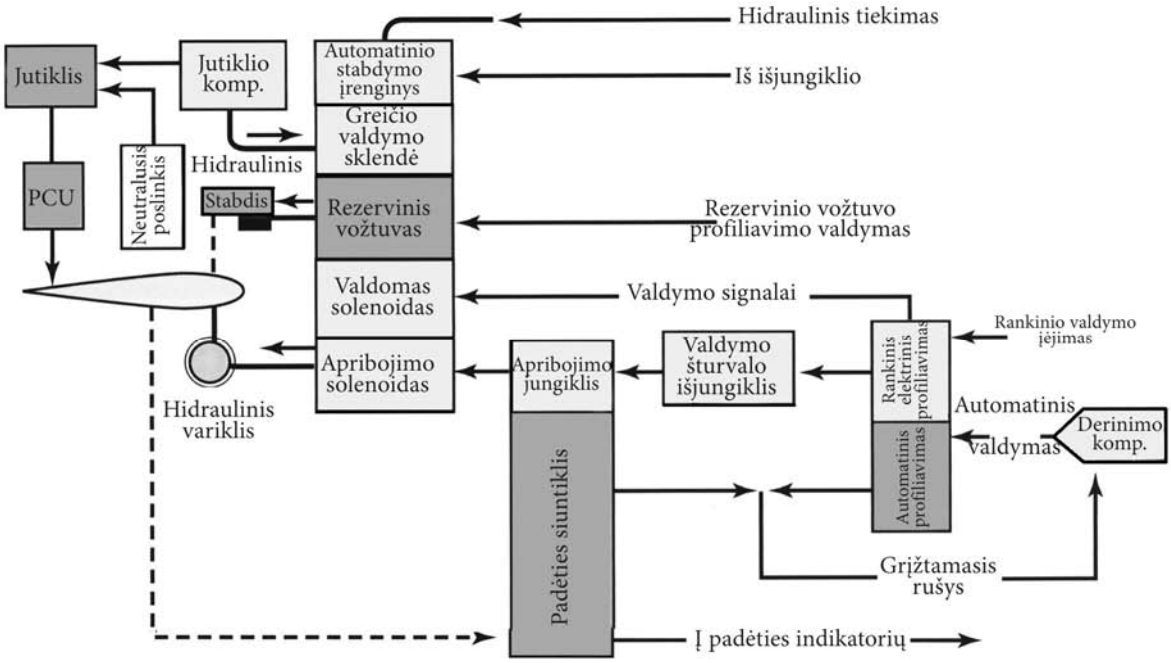


2.4.16 pav. Automatinės trimerio sistemos veikimo schema

Šioje sistemoje jutiklis palygina viršutinio aukščio vairo valdymo troso ir apatinio troso įtempimą ir, jei aukščio vairas vykdo komandą į viršų, jutiklis aptinka išsibalansavimą trosų įtempime. Dėl to sukuriamas klaidos signalas, kuris sustiprinamas ir tiekiamas į trimerio motorą. Trimerio plokštuma pavažiuoja žemyn, kol valdymo troso įtempimas sumažėja iki minimumo. Užsparnio kompensatoriaus grandinė taip pat gali būti pridėta į valdančiojo signalo aptikimo grandinę, kad kompensuotų bet kokį posvyrio pakitimą, kuris gali atsirasti, kai yra išleisti užsparniai ir kai dirbama per prijungtą prie užsparnių padėties fiksavimo relę.

Jei orlaivis skraidinamas rankiniu būdu trimeriavimas per kontrolės jungiklį kontroliuoja galios tiekimą į servo sistemą.

Dideli transportinės kategorijos reaktyviniai orlaiviai. Šio tipo orlaiviuose aukščio vairą paprastai valdo hidraulinės jėgos ir judėjimas orlaivio uodegoje. Naudojama daug sudėtingesnė sistema. Stabilizatoriaus valdymas atliekamas pagal automatinio trimerio signalą, kuris kontroliuoja hidraulinius variklius. Trimerio variklis sujungtas per movų agregatą ir varžtą su stabilizatoriumi. Tokios sistemos blokinė schema yra parodyta 2.4.17 pav.



2.4.17 pav. Didelių orlaivių automatinio aukščio vairo valdymo sistemos struktūra

Šioje sistemoje automatinis trimeriavimas pasiekiamas judinant kintamojo judesio stabilizatorių, kai aukščio vairui paliekamas pilnas judesys kontroliuoti bet kokį posvyrio pokytį, vadovaujamą AFCS. Jei jutikliai keletą sekundžių aptinka aukščio vairą per toli nuo teisingos padėties, stabilizatorius juda aukštyn arba žemyn, kaip yra reikalinga, taip sumažindamas autopiloto poreikį laikyti aukščio vairus nuo teisingos padėties. Kai aukščio vairai priartėja prie teisingos padėties, jutikliai sustabdo stabilizatoriaus operaciją. Pavyzdžiui, jei AFCS reikalauja orlaivio nosį nuleisti žemyn, tai posvyrio kontrolės įrenginys aktyvuoja energijos kontrolės įrenginį (PCU), ir jis pastato aukščio vairą žemyn. Tuo pat metu sukuriamas signalas trimerio grandinėje ir, kai pasiekiama panaši į slenksčius padėtis tarp aukščio vairo ir stabilizatoriaus, trimerio grandinė aktyvuojama. Tada signalas pereina per solenoidą aktyvuodamas hidraulinį motorą ir perstumdamas stabilizatorių. Nusistovi nauja neutrali stabilizatoriaus padėtis – signalas siunčiamas atgal į aukščio vairo padėties grandinę, perstato aukščio vairą. Aukščio vairo poslinkis ar neutralus poslinkis didina stabilizatoriaus kontrolės įtaką, pasiekiamą per neutralaus poslinkio traukės mechanizmą.

Apribojimų jungikliai apsaugo stabilizatorių nuo nuvažiavimo virš nustatytų apribojimų, o stabilizatoriaus trimerio indikatorius prietaisų skydelyje parodo trimerio paviršių padėtis. Klaidos aptikimo grandinės stebi sistemą nuo šių perspėjimų:

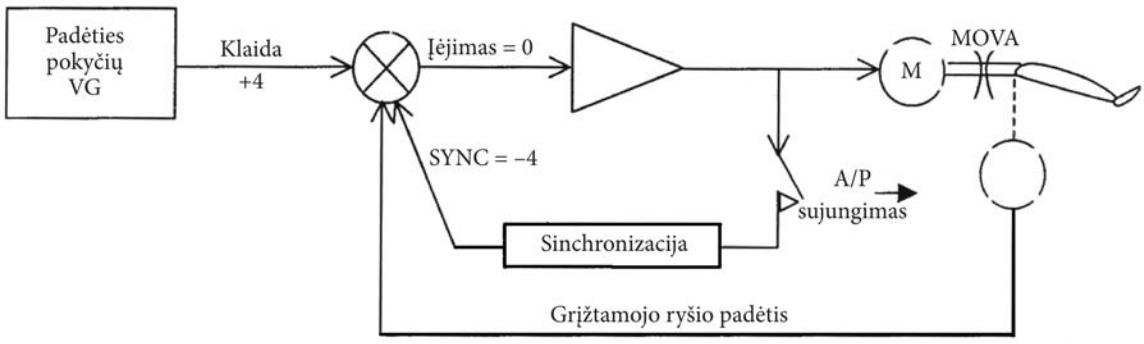
– jei automatinė trimerio sistema nebeveikia, prietaisų skydelyje įsijungia įspėjimo lemputė;
– kai aptinkamas pernelyg didelis trimerio įėjimo signalas, nuskamba garsinis įspėjimas.

Blokatoriai. Tam, kad autopilotas galėtų saugiai valdyti skrydžio valdymo įrenginius, turi būti patenkinta keletas sąlygų. Šios sąlygos skiriasi skirtingiems autopilotams, bet sudaro keletą jungiklių, vadinamų blokatoriais, pavidalą. Sąrašas sąlygų prieš įjungiant autopilotą:

– leidžiamos kintamosios ir nuolatinės srovės nuokrypos;
– sureguliuoti ir sumontuoti giroskopai;
– įjungta pokrypio slopinimo sistema;
– prieinama automatinė posvyrio profiliavimo sistema;
– prieinama Macho profiliavimo sistema;
– saugotis instinktyviai nenuspausti atjungimo (išjungimo) mygtukų;
– veikianti CADC;
– rankinio valdymo svirtys yra neutralioje padėtyje (pvz.: šturvalas, sukimo rankenėlė, posvyrio jungiklis);

Sistemą įjungti galima tuomet, kai įjungti visi blokatoriai.

Sinchronizacija. Labai svarbu, kad tarp rankinio ir automatinio skrydžio valdymo perėjimas būtų kuo švelnesnis (pvz.: jei orlaivis yra kilimo etape, būtų nepageidautina nustatyti posvyrio duomenis į nulinę padėtį, kai įjungiamas autopilotas). Prieš įjungiant, bet koks konkrečiame kanale esamas signalas pereina per sinchronizatoriaus grandinę, kur atsiranda priešinga, lygi padėčiai klaida, kuri išlaikoma iki autopiloto įjungimo (2.4.18 pav.).



2.4.18 pav. Sinchronizacijos grandinės schema

Pavyzdžiui, orlaiviui pasvirus į viršų prieš įjungimą, šią padėtį atspindintis klaidos signalas pereina per kanalą ir išvysto priešingą signalą sinchronizatoriaus grandinėje. Kai įjungiamas autopilotas, sinchronizatoriaus įėjimas atsijungia ir sinchronizatoriaus padėtis sustingdoma esamoje padėtyje, suteikdama sistemai informaciją.

Instinktyvusis atjungimas. Pilotui suteikiama galimybė atjungti autopilotą „instinktyvaus atjungimo jungikliais“, kurie yra išdėstyti ant šturvalo. Šie jungikliai yra šturvalo išorinėje dalyje, taigi ranka, nevaldanti traukos, gali juos junginėti. Taip pat numatyta galimybė išjungti autopilotą, pajudinus šturvalą. Jei autopilotas išjungiamas per instinktyvaus atjungimo kanalą, skrydžio įgula gauna trumpa garsinį ir vizualinį perspėjimą.

2.5. Automatinio tūpimo sistema

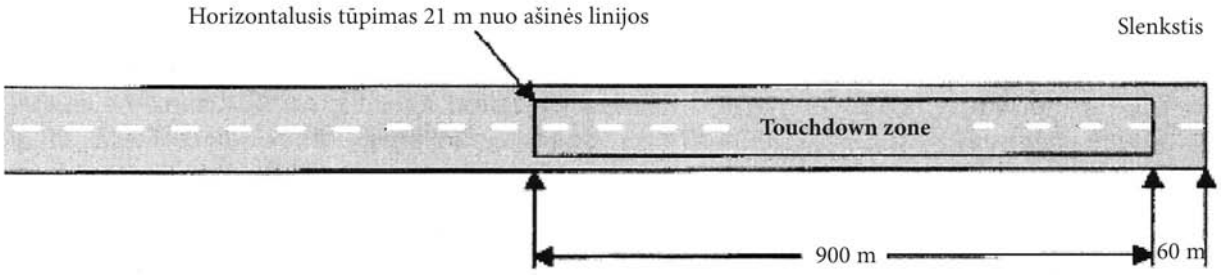
Panaudojant automatinio tūpimo sistemą, įmanoma nusileisti paskirties aerodrome, net jeigu meteorologinės sąlygos jame yra prastos, nenukreipiant orlaivio į kitą aerodromą ir taip taupant keleivių vežimo išlaidas. Bet koks orlaivio nukreipimas nuo paskirties aerodromo reiškia, kad jis nėra paskirties taške ir į pirminio išvykimo aerodromą turės grįžti be pelną teikiančių keleivių.

Patvirtinant orlaivio galimybes tūpti automatiškai, jis turi atitikti minimalius JAR-AWO (*All Weather Operations*) reikalavimus.

2.5.1. Pagrindiniai reikalavimai automatinio tūpimo sistemai

Pagrindiniai reikalavimai automatinio tūpimo sistemai yra šie:

– saugumo lygis, tupiant automatiniu būdu, neturi būti žemesnis nei tupiant rankiniu būdu, ir nelaimingo atsitikimo rizika turi būti mažesnė nei 1×10^{-7};
– įgulos nariai turi turėti galimybę adekvačiai stebėti tūpimo eigą tam, kad įvykus kritiniam gedimui bet kuriuo metu būtų galima atjungti autopilotą ir rankiniu būdu valdyti orlaivį, turint minimalius reikiamus orlaivio valdymo įgūdžius;
– aerodromas turi turėti reikiamas ir tinkamai suderintas radijo patariamąsias valdymo priemones;
– neturi būti tikimybės, kad orlaivis nutūps už 2.5.1 pav. parodytų leistinųjų ribų;
– tūpimas turi įvykti 60–900 m atstumu nuo KTT slenksčio;
– orlaivio važiuoklė negali būti toliau kaip 21 m nuo KTT ašinės linijos, kai KTT yra 45 m pločio.



2.5.1 pav. Tūpimo ribos KTT

2.5.2. Automatinio tūpimo sistemos terminai

Kad orlaivis galėtų atlikti visiškai automatizuotą priartėjimą ir tūpimą, reikia, kad jis būtų aprūpintas dviem (ar daugiau) autopilotais ir automatine greičio valdymo sistema. Kompleksinis sistemų panaudojimas užtikrina, kad, esant autopiloto sistemos pagrindinio elemento gedimui, orlaivis nenukryps nuo priartėjimo trajektorijos.

Kiti terminai yra susiję su automatinio tūpimo sistemos gedimais skrydžio metu:

Sugedusioji-veikiančioji (*Fail-Operation*)

Automatinio tūpimo sistema yra *sugedusioji-veikiančioji* stadijoje, jeigu gedimas įvyksta žemiau pavojaus aukščio priartėjimo, išlyginimo bei tūpimo fazėje ir likusi automatinės sistemos dalis gali užbaigti tūpimą. Gedimo atveju automatinio tūpimo sistema išjungia sistemą ***sugedusioji-pasyvioji*** (*Fail-Passive*). *Sugedusioji-veikiančioji* sistema dar žinoma kaip *sugedusioji-aktyvioji* (*Fail-Active*) sistema.

Sugedusioji-pasyvioji (*Fail-Pasive*)

Automatinio tūpimo sistema yra *sugedusioji-pasyvioji* stadijoje, jeigu įvykus gedimui tūpimas negali būti atliktas automatiškai, nors ir nėra nukrypimų nuo orlaivio tūptinės ar padėties erdvėje. *Sugedusioji-pasyvioji* dar žinoma kaip (*Fail Soft*) sistema.

Dviguba-dviguba (*Dual-Dual*)

Šis terminas kai kurių gamintojų yra naudojamas apibūdinti porinei kontrolės sistemai *sugedusioji-veikiančioji*, turinčiai dvi pasyvias stebėjimo sistemas. Toks sistemos tipas nėra sudvejintoji kompiuterinė sistema, kadangi kontrolės sistema tuo pat metu gali būti ir aktyvi, ir neaktyvi. Kontrolės prietaisui aptikus gedimą su juo asocijuotoje sistemoje, automatiškai įsijungia kita sistema su atitinkamu kontrolės prietaisu.

Pavojaus aukštis (*Alert Height*)

Pavojaus aukštis yra specializuotas radijo aukštis, pagrįstas orlaivio parametrais ir jo tūpimo sistema *sugedusioji-veikiančioji*. Jeigu veikiant sistemai virš pavojaus aukščio įvyksta gedimas vienoje iš orlaivyje būtinų rezervinių operacinių sistemų (įskaitant tūpimo ridos apskaičiavimo sistemą ir grįžimo režimo hibridinę sistemą) užėjimas tūpimui nutraukiamas ir vykdoma ėjimo į antrąjį ratą procedūra, nebent yra įmanoma grįžti į didesnį apsisprendimo aukštį. Jeigu gedimas vienoje iš orlaivyje būtinų rezervinių operacinių sistemų įvyksta žemiau pavojaus aukščio, gedimas ignoruojamas ir tęsiamas priartėjimas tūpti tęsiamas.

Apsisprendimo aukštis (*Decision Height*)

Tai yra aukštis, apibūdinamas kaip orlaivio ratų aukštis virš KTT, kuriame turi būti vykdoma nuėjimo į antrąjį ratą procedūra, nebent yra matomi vizualūs orientyrai ir orlaivio padėtis bei tūptinės įvertinimas leidžia tęsti užėjimą tūpimui ir saugiai nutūpti.

2.5.3. Reikalavimai automatinio tūpimo sistemos įrangai

Pateikiamas sistemų ir orlaiviuose su automatinio tūpimo sistema reikalaujamos įrangos sąrašas, atsižvelgiant į apsisprendimo aukščio reikšmę:

Apsisprendimo aukštis 199–100 pėdų (60–30 m)

1. Autopilotas su ILS prijungimo režimu. (**Pastaba.** Skrydžio valdymo sistemą su ILS prijungimo režimu galima naudoti įvykus gedimui ar atsijungus autopilotui).
2. Automatinė greičio reguliavimo sistema (nebent įrodoma, kad greičio reguliavimas neturi įtakos per dideliam orlaivio įgulos darbo krūviui).
3. Radijo aukščiamatis.
4. Perspėjimo sistema apie ILS nuokrypų viršijimą.

Apsisprendimo aukštis 99–50 pėdų (30–15 m)

1. Įranga, kaip ir esant apsisprendimo aukščiui 199–100 pėdų.
2. Autopilotas su automatiniu tūpimo režimu.

Apsisprendimo aukštis žemiau kaip 50 pėdų (žemiau kaip 15 m)

1. Įranga, kaip ir esant apsisprendimo aukščiui 199–100 pėdų
   a) autopilotas su automatiniu tūpimo režimu *sugedęs-veikiantis* ir automatiniu nepavykusio užėjimo režimu;

arba

   b) autopilotas su automatinio tūpimo ir nepavykusio užėjimo režimais bei tūptinės orientavimo vaizduokliu.

Apsisprendimo aukščio nėra

1. Įranga tokia pati, kaip ir apsisprendimo aukščiui, žemesniam kaip 50 pėdų:
   a) autopilotas su tūpimo ridos *sugęsdęs–veikiantis* režimu

arba

   b) vadovaujantysis *sugedęs-veikiantis* tūpimo ridos orientavimo vaizduoklis

arba

   c) autopilotas su tūpimo ridos režimu ir vadovaujančiuoju tūpimo ridos orientavimo vaizduokliu.
2. Stabdymo sistema su ratų praslydimo blokavimu.

2.5.4. Automatinio priartėjimo, išlyginimo ir tūpimo seka

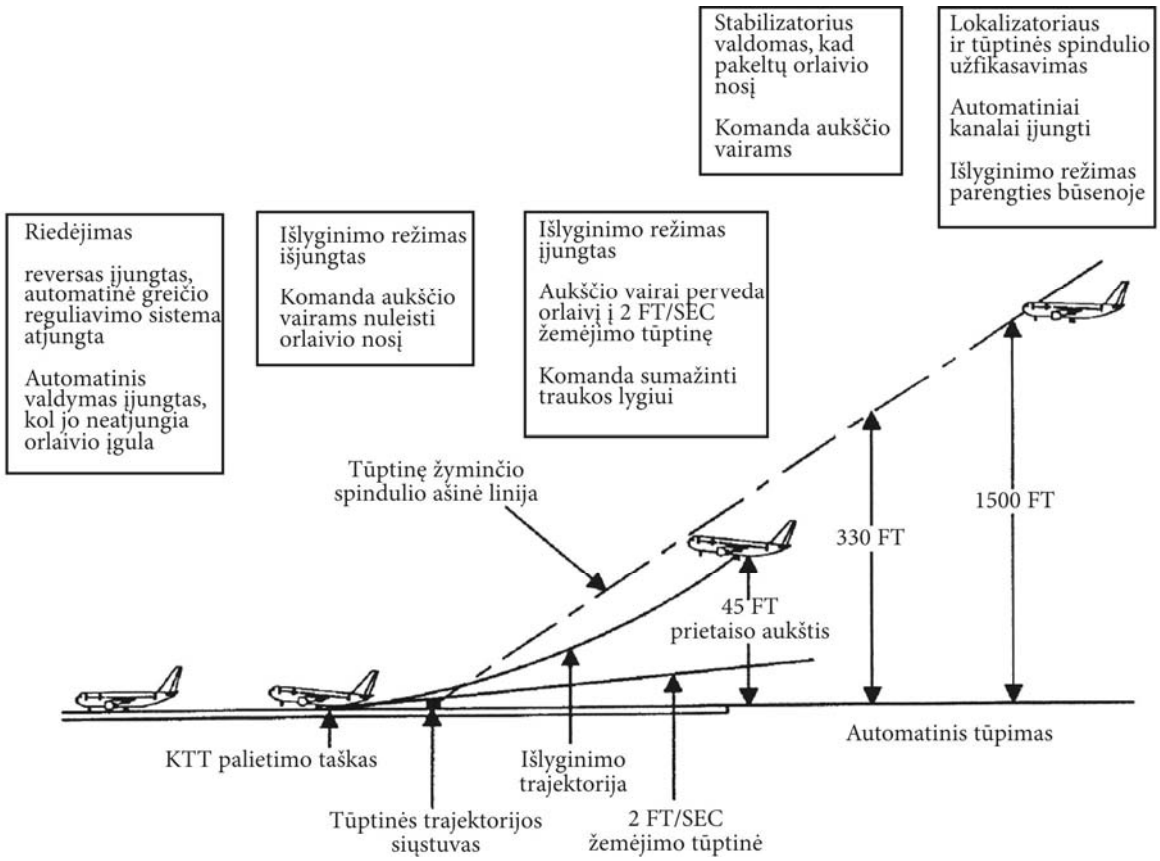
2.5.2 pav. parodyti orlaivio, aprūpinto trijų kanalų autopilotu (kaip *Boeing 757*) skrydžio etapai, susiję su automatinio priartėjimo, išlyginimo ir tūpimo fazėmis.

Priklausomai nuo pajungtų kanalų skaičiaus sistema vykdo automatinį tūpimą **Land 2** arba **Land 3** būsenos, kuri atvaizduojama EADI.

Land 2 reiškia, kad pajungti du autopiloto kanalai su sistemos galimybe veikti *sugedusioji-pasyvioji* režimu.

Land 3 reiškia, kad įjungti visi trys autopiloto kanalai su sistemos galimybe veikti *sugedusioji-veikiančioji* (*aktyvioji*) režimu.

Kreiserinio skrydžio ir priartėjimo į oro uostą metu paprastai vienas autopilotas valdo orlaivį išilgai pasirinktojo maršruto. Kai orlaivis priartėja prie oro uosto, skrydžio įgula rankiniu būdu pasirenka kitus autopilotus ir, kada valdymo stende pasirenkamas priartėjimo režimas APPROACH MODE (APP), lokalizatorius ar tūptinės indikatorius, kartu su kitais dviem autopilotais pereina į parengties režimą. Kai orlaivis, jau užfiksavęs lokalizatorių ir tūptinę, kerta 1500 pėdų radijo aukštį, kiti du buvę išjungti autopilotai automatiškai įsijungia. Orlaivio įgula informuojama apie **Land 3** būseną ir orlaivis tęsia skrydį tūptinės trajektorija.



2.5.2 pav. Automatinio tūpimo etapai

Pastaba. Jeigu 1500–200 pėdų radijo aukštyje įvyksta gedimas, sistema pati pasikrauna į *sugedusioji-pasyvioji* sistemą, ir pereinama į **Land 2** būseną.

Esant 330 pėdų radijo aukščiui, panaudojant automatinį kintamojo kampo stabilizatoriaus reguliavimą, orlaivio nosis pakeliama aukštyn. Kai orlaivis kerta pavojaus aukštį (paprastai esant 200 pėdų radijo aukščiui), sugrįžimas į būseną **Land 2** dėl gedimo tikimybės yra ribojamas, kol orlaivis išlyginimo metu nepasiekia mažesnio nei 40 mazgų greičio.

Orlaiviui esant 45 pėdų aukštyje virš Žemės, automatiškai įsijungia išlyginimo režimas, ir žemėjimo greitis laipsniškai mažėja, kol pasiekia 2 pėdų per sekundę žemėjimo greitį KTT palietimo metu. Tuo pačiu metu automatinė greičio reguliavimo sistema sumažina variklių trauką, kad orlaivis išlaikytų tūptinės trajektoriją. Orlaivio važiuoklei esant 5 pėdų aukštyje, išlyginimo režimas išsijungia ir vyksta perėjimas į KTT palietimo ir riedėjimo režimą. Orlaivis išlieka **Land** būsenos, kol skrydžio įgula jos neišjungia.

Visos šios sistemos sukurtos automatiniam tūpimui vykdyti, esant bet kokioms meteorologinėms sąlygoms, ir turi patikimumo rodiklį, geresnį nei 1×10^{-7}.

2.5.5. Meteorologinių sąlygų minimumai

Vykdant prasto matomumo skrydžių procedūras, meteorologinių sąlygų ribos tūpimui yra apibrėžiamos taip:

KTT matomumo nuotolis (RVR)

Tai dydis, apibūdinantis KTT nuotolį tūpimo ar kilimo kryptimi, kuriame gali būti matomi didelio intensyvumo žiburiai. Skrydžio valdymo tarnybos perduoda šiuos duomenis orlaiviui ir aprūpina skrydžio įgulą informacija apie šiuo metu oro uoste esančias matomumo sąlygas.

Apsisprendimo aukštis

Tai yra aukštis, apibūdinamas kaip orlaivio ratų aukštis virš KTT slenksčio, kuriame turi būti vykdoma ėjimo į antrąjį ratą procedūra, nebent matomi vizualūs orientyrai ir orlaivio padėtis bei tūptinės įvertinimas leidžia tęsti priartėjimą ir saugiai nusileisti.

Šalies licencijavimo administracija nustato minimalius šių dviejų parametrų dydžius, apibūdinamus kaip ***Meteorologinių sąlygų minimumai*,** įvairiems orlaivių tipams ir skirtingiems oro uostams.

2.5.6. ICAO kategorijos, tūpiant prasto matomumo sąlygomis

Ši kategorijų sistema sudaryta remiantis tuo, kad leistinajam apsisprendimo aukščio nuotoliui adekvataus vizualaus orientyro tikimybė turi būti kuo didesnė.

1 kategorija:

operacijos iki minimalaus 200 pėdų apsisprendimo aukščio ir RVR 800 m, su didele sėkmingo priartėjimo tikimybe.

2 kategorija:

operacijos iki mažesnio nei 1 kategorijos, bet ne mažesnio nei 100 pėdų apsisprendimo aukščio ir RVR 300 m, su didele sėkmingo priartėjimo tikimybe.

3A kategorija:

operacijos iki KTT ir ant KTT paviršiaus, turint vizualųjį išorinį orientyrą paskutinėje tūpimo fazėje ir esant RVR minimumui 200 m.

3B kategorija:

operacijos iki KTT ir ant KTT bei riedėjimo takų paviršių, su tik vizualiajam riedėjimui pakankamu matomumu, prilyginamu 50 m RVR reikšmei.

3C kategorija:

operacijos iki KTT ir ant KTT bei riedėjimo takų paviršių, be išorinių vizualiųjų orientyrų.

Šios kategorijos taip pat atspindi automatinio priartėjimo bei automatinio tūpimo sistemų tobulinimo pažangą ir žymi atskirų AFCS galimybes.

Toliau pateiktas įvairiuose oro uostuose galimos antžeminės įrangos, atitinkančios kategorijų charakteristikas, sąrašas:

– ILS žymeklis ir tūptinės indikatorius;
– artėjimo žiburiai;
– KTT ir riedėjimo takų žiburiai.

Kartu su ***automatinio tūpimo sistemos*** sąvoka dažnai naudojamas terminas – ***skrydžių operacijos bet kokiu oru.*** Šis terminas reiškia, kad nėra jokių meteorologinių sąlygų, galinčių riboti sėkmingą orlaivio tūpimą ir kilimą. Reikia suprasti, kad tai nereiškia, kad orlaivis gali tūpti esant didesniam vėjui nei yra jam maksimaliai leistinas (sertifikuotas) arba gali tūpti ant netinkančio tam KTT dėl susikaupusio vandens, patižusio sniego ar ledo.

2.5.7. Pagrindiniai automatinio tūpimo reikalavimai

Automatinio tūpimo metu orlaivis turi būti taip valdomas, kad:

– orlaivio važiuoklė paliestų KTT dangą ne per arti kraštų ir ne per toli nuo KTT pradžios;
– orlaivis tūptų išlaikydamas nedidelį žemėjimo greitį tam, kad tūpimo metu nesulūžtų važiuoklė;
– KTT palietimo metu orlaivio greitis turi būti pakankamai mažas, kad likusio KTT ilgio pakaktų orlaiviui sustoti.

Kad įvykdytų išvardytas sąlygas:

– galutinis orlaivio žemėjimo greitis neturi būti didesnis nei 1–2 pėdos per sekundę;
– orlaivio greitis, laipsniškai mažinant variklių trauką išlyginimo fazėje, turi būti sumažintas iki 1,15 V_s, nuo 1,3V_s priartėjimo fazėje;
– orlaivio sparnų išlyginimas turi būti įvykdytas prieš faktinį tūpimą ir negali būti jokio slydimo prieš paliečiant KTT.

Kad visos čia išvardytos sąlygos būtų išpildytos, orlaivis vienu metu turi būti valdomas visų trijų ašių kryptimis.

Bet kokia sistema, atitinkanti bent jau čia išvardytas sąlygas, turi būti taip projektuojama taip, kad:

– būtų siekiama aukšto sistemos vientisumo ir patikimumo, nepamirštant, kad sistema privalo turėti žymią įtaką orlaivio valdymo sistemoms, įskaitant trauką net ir esant orlaiviui prie Žemės;
– priartėjimo ir tūpimo manevrų metu teikiama proceso eigos informacija leistų pilotams perimti orlaivio valdymą, įvykus kritiniam sistemos gedimui, esant orlaiviui netoli Žemės paviršiaus;
– automatinė išorinių būdingų orientyrų sistema, pakeičianti skrydžio įgulos tiesioginį matymą, turi turėti tokį patį aukštą vientisumo ir patikimumo lygį, kaip ir reikalaujama *on board* sistemoje.

2.5.8. Sistemos patikimumas ir vientisumas

Prietaisai, sukurti riboti automatinių valdymo sistemų įtakai nevaldomose situacijose, susidariusiose dėl sistemos gedimų, gali būti įtraukiami į įprastines valdymo sistemas. Šitie prietaisai savo paskirtimi paprastai efektyvūs tik iki tam tikro specializuoto „persilaužimo“ aukščio (t. y. iki priartėjimo aukščio, kuriame valdymo sistema išsijungia, bet šios sistemos neatitinka automatinio tūpimo sistemoms taikomų reikalavimų).

Saugumą užtikrinančių prietaisų panaudojimas priklauso nuo prieštaringų reikalavimų:

– prietaisai turi taip riboti nevaldomų situacijų atsiradimą, kad skrydžio įgula galėtų saugiai ištaisyti susidariusią padėtį;
– prietaisai neturi riboti valdymo sistemos, jei tūptinės trajektorija sutrikdoma dėl pašalinių trukdžių.

Saugumą užtikrinančių prietaisų panaudojimą (įprastinių valdymo sistemų atveju) taip pat riboja dar vienas veiksnys – jų nesugebėjimas apsaugoti nuo pasyviųjų gedimų. Bus laikoma, kad pasyvieji gedimai

yra bevertės reikšmės, kol jie tiesiogiai nepaveiks skrydžio trajektorijos. Todėl nebus išlaikomi numatyti ir tikslūs automatinio tūpimo manevrai, ir visa tai skatins pavojingos situacijos susidarymą.

Iš viso to išplaukia, kad automatiniam tūpimui įvykdyti AFCS operacijos turi būti tokio pobūdžio:

– neturi iškraipyti skrydžio trajektorijos dėl atsiradusių aktyvių sistemos sutrikimų;
– išilgai visos skrydžio trajektorijos AFCS turi turėti adekvačią įtaką pakankamai tiksliai kontrolei;
– turi būti perspėjimo apie pasyviuosius gedimus sistema;
– dėl atsiradusio pasyviojo ar aktyviojo sistemos gedimo neturi būti nutraukti numatyti skrydžio manevrai.

Visoms šioms problemoms spręsti yra naudojamas sistemos dubliavimo principas (t. y. panaudojamos mišriosios sistemos, veikiančios tokiu principu, kad atskiras gedimas sistemoje neturi reikšmingos įtakos orlaivio charakteristikoms priartėjimo ir tūpimo fazių metu).

– orlaivio variklius valdo automatinė greičio reguliavimo sistema, kol neįjungiamas variklių reversas;
– orlaivį valdo AFCS, kol jos neatjungia skrydžio įgula.

Nuo 2000 pėdų iki apsisprendimo aukščio skrydžio įgula bet kuriuo metu gali nuspręsti nutraukti priartėjimo procedūrą, nuspausdama TOGA jungiklį, esantį ant variklio traukos valdymo svirties, nuo kurio priklauso variklio galios reguliavimas iki traukos, reikalingos nuėjimo į antrąjį ratą procedūrai. Kitas TOGA jungiklio nuspaudimas padidins variklių trauką iki maksimalios reikšmės. Tuomet nuėjimo į antrąjį ratą fazė sąveikauja su AFCS ir GA atvaizduojama ADI. Orlaivio polinkį valdantis kanalas siunčia kalibravimo komandą ir orlaivis pervedamas į reikiamą kalibravimo polinkį.

2.6. Traukos valdymo sistemos

Patys moderniausi orlaiviai yra aprūpinami variklio traukos kontrolės ir valdymo sistemomis. Todėl būtina žinoti, kaip nustatoma variklio trauka, kaip ji valdoma bei kaip tam gaunami pirminiai duomenys.

2.6.1. Traukos nustatymo sąlygos

Pateikiamos orlaivio techninėje bei eksploatacinėje dokumentacijoje traukos kreivės ir diagramos yra naudojamos nominaliajam variklio našumui įvertinti, apibūdinamam **variklio slėgio santykio (EPR**) ir (ar) **turbinos mentelių sūkių greičio (N1)** parametrais, priklausančiais nuo supančios temperatūros ir barometrinio slėgio.

Laikas, variklio našumas ir išmetamųjų dujų temperatūra (EGT) riboja orlaivio nominaliąją kilimo trauką. Maksimali ilgalaikė, maksimali kilimo ir maksimali kruizinio greičių trauka yra apribojama EGT ilgalaikiam ar tam tikram laiko periodui.

Variklio slėgio santykis (EPR)

Tai praeinančios per variklį oro masės ir jos išmetamojo greičio tūtoje pasiekiamas naudingosios traukos lygis. Šio traukos lygio rodiklis – išmetant dujas sukelto slėgio ir prieš kompresoriaus įėjimą esančio slėgio santykis, vadinamas variklio slėgio santykiu (EPR). EPR išreiškiamas procentais, kaip santykinė traukos reikšmė.

RPM, N_1, N_2 ar N_3

Tai sūkiais per minutę (RPM) turbinos mentelių sukimosi greitis, dažniausiai išreiškiamas procentais nuo maksimaliosios reikšmės.

EGT

Išmetamųjų dujų temperatūra, kuri turi būti stebima, siekiant išvengti per didelės išmetamųjų dujų temperatūros, galinčios sugadinti variklio turbiną.

Nominali maksimalioji ilgalaikė trauka

Tai yra traukos lygis, leistinas neribotiems naudojimo periodams pagal JAR ir orlaivio skrydžio žinyno nurodymus.

Maksimalioji ilgalaikė trauka (MCT)

Tai traukos lygis, leistinas piloto nuožiūra neatidėliotinais atvejais. Šią trauką apriboja orlaivio sertifikavimo reikalavimai, kilimo operacijos ir orlaivio korpuso gamintojo nuorodos.

Maksimalioji aukštėjimo trauka

Tai maksimali nustatyta trauka aukštėjimo fazei, kuri tam tikruose varikliuose yra identiška nominaliai maksimaliajai ilgalaikei traukai. Pasirenkant šią trauką, reikia nustatyti variklio droselio sklendės valdymo rankeną į EPR ar N1. Taip pat reikia įvertinti orlaivio kilimo profilį bei jėgainės įvado temperatūrą. Kilimo traukos kreivės ir grafikai yra pateikti orlaivių skrydžio žinyne.

Maksimalioji kreiserinė trauka

Tai maksimali leistinoji trauka kreiseriniam naudojimui. Ji artima prieš tai aprašytiems traukos limitams, kadangi turi bendrus garantinius apribojimus ir yra nustatyta variklio gamintojo, siekiant užtikrinti optimalų variklio veikimo laiką.

2.6.2. Kilimo ir kreiserinės traukos skaičiavimas

Pasirenkant reikiamą traukos lygį tam tikram orlaivio kilimo arba kreiserinio skrydžio režimams, orlaivio įgula turi žinoti orlaivio skrydžio žinyne esančius duomenis. Paprastai minimaliosios traukos lygiui nustatyti naudojamas vadinamasis menamosios temperatūros metodas. Jis grindžiamas menamosios temperatūros augimo grafiko, šiek tiek viršijančio faktinį aplinkos temperatūros (OAT) augimą, apskaičiavimu pagal reikiamą kilimo trauką ir orlaivio greičius. Menamosios temperatūros didėjimo procedūra priverčia orlaivio įgulą šiek tiek mažinti trauką, atsižvelgiant į esamas sąlygas ir praktinius apribojimus.

Kilimas

Tai orlaivio traukos lygis, atitinkantis orlaivio galios valdymo rankenos padėtį, kai pasiekiami atitinkami parametrų (N1 ar EPR) lygiai pagal nominaliosios kilimo traukos nustatymo grafikus ar kreives. Tam tikriems varikliams maksimaliosios ilgalaikės ir maksimaliosios kilimo traukos lygiai gali būti vienodi.

Esant kilimo metu fiksuotai variklio droselio sklendės valdymo rankenos padėčiai, kai absoliučioji oro temperatūra TAT (*Total Air Temperature*) mažėja didėjant aukščiui, N1 ir EPR vertės progresyviai didėja priklausomai nuo traukos kreivių. Paprastai kilimo metu gali būti reikalingi vienas ar du droselio sklendės valdymo rankenos pataisymai priklausomai nuo to, ar atliekamas didelio greičio ar lėkštas kilimas. Pastebimos temperatūros ir greičio variacijos gali pareikalauti lengvų variklio droselio sklendės valdymo rankenos padėties pataisymų, kad būtų išvengta traukos kreivių lygių viršijimo. Tarp kitko, supančios temperatūros ir Macho skaičiaus įprasti pakitimai nereikalauja tokių pataisymų. Pastovus EGT stebėjimas kilimo metu yra reikalingas, kad nebūtų viršytas leistinasis EGT lygis.

Kreiserinis skrydis

Kai pasiektas pasirinktas skrydžio lygis, kilimo trauka nekeičiama, kad orlaivis galėtų pasiekti pasirinktą kreiserinį greitį. Norint išlaikyti pasirinktą greitį, reikia nustatyti reikiamą N1 ar EPR priklausomai nuo kreiserinio skrydžio kreivių, kurios atitinka esamas kreiserines sąlygas. Kreiserinės traukos vertės priklauso nuo kreiserinio greičio, CAS (kalibruotojo orinio greičio), Macho greičio, orlaivio svorio, TAT ir skrydžio aukštyje esančio slėgio. Orlaivio dokumentacijoje pateikti grafikai ir kiti nurodymai apima visus realiųjų derinių veiksnius. Maksimalioji kreiserinė trauka apribojama variklio garantiniais reikalavimais ir neturėtų būti viršijama, bandant palaikyti nustatytą aukštį ar greitį.

2.6.3. Kreiserinio skrydžio valdymo būdai

Procedūros naudojamos kreiseriniam skrydžiui valdyti labiausiai priklauso nuo skrydžio laiko. Trumpiems skrydžiams su nustatytais periodais ir priklausomai nuo orlaivio jėgainės tipo bei kreiserinės aplinkos kreiserinio skrydžio variklio droselio sklendės valdymo rankenos nustatyta fiksuota padėtis suteikia

reikiamą sunaudojamo kuro ir skrydžio laiko balansą. Kai traukos lygis nustatytas, kad pasiektų kreiserinį greitį, traukos palaikymo padėtis gali išlikti ir kreiserinio skrydžio etape.

2.6.4. Elektroninis variklio valdymas (EEC)

Pirma elektroninė variklio valdymo sistema EEC (*Electronics Engine Control*) buvo komandinio tipo, naudojanti pasiteisinusius hidromechaninius valdymo įtaisus. Pagrindiniai šios sistemos valdomieji parametrai yra kuro sąnaudų, oro išmetimo greičio ir statoriaus mentelės padėties kontrolė.

Šioje valdymo sistemos režime orlaivio įgula tiesiog nustatydavo variklio droselio sklendės valdymo rankeną į reikalaujamą padėtį ar maksimalaus kilimo poziciją ir valdymo sistema automatiškai nustatydavo EPR, kad išlaikytų trauką nepriklausomai nuo skrydį lydinčių sąlygų. Valdymo sistema taip pat apribodavo variklio greitį ir temperatūrą, kuri užtikrindavo, kad varikliai veiktų visą skrydžio laiką. Jei sistemoje atsirasdavo klaida, tai valdymo komandos būdavo perduodamas hidromechaninei sistemai, kartu išlaikant reikalingą traukos lygį. Bet kada galėjo būti įvykdomas pilnas hidromechaninės sistemos perdavimas tiesioginiam valdymui.

Kai kurios elektroninės kontrolės sistemos veikia tik kaip ribotuvai. Pavyzdžiui, jei variklio veleno greitis ar išmetamųjų dujų temperatūra EGT artėja prie saugaus naudojimo ribų, tai atliekamas automatinis kuro tiekimo koregavimas, kad būtų išlaikomas saugus veleno sukimosi greičio lygis ar EGT.

Moderniosios elektroninės variklio pilno valdymo sistemos (EEC) valdo visas variklio funkcijas, atsisakant hidromechaninės kontrolės sistemų. Tokios valdymo sistemos dažnai papildomos variklio kuro sąnaudų valdymo skaitmenine kontrolės sistema (FADEC).

2.6.5. Skaitmeninė variklio valdymo sistema (FADEC)

Naujesniuose orlaiviuose variklius nuo pakilimo iki nutūpimo valdo elektroninė valdymo sistema FADEC *(Full authority digital engine control).* FADEC yra specializuota skaitmeninė dujų turbininių variklių kuro sąnaudų valdymo sistema, veikianti visų variklio režimų metu.

Šia sistema valdomas ne tik degalų tiekimas varikliui, bet ir jo rotoriaus bei statoriaus mentelių kampas, variklių sūkių dažnis. Kontroliuojami ir valdomi pagrindiniai variklio parametrai, atsižvelgiant į oro slėgį ir lauko temperatūrą, oro tiekimą salonui ir antiledodaros sistemai. FADEC valdo variklio paleidimą (valdo degalų vožtuvą, degalų tiekimą, uždegimą, matuoja variklio velenų sūkius ir dujų temperatūrą). FADEC, kurios variklių svirčių automatiškai nevaldo. Tuomet svirčių padėties signalai siunčiami į FADEC, kurio kompiuteris valdo variklį.

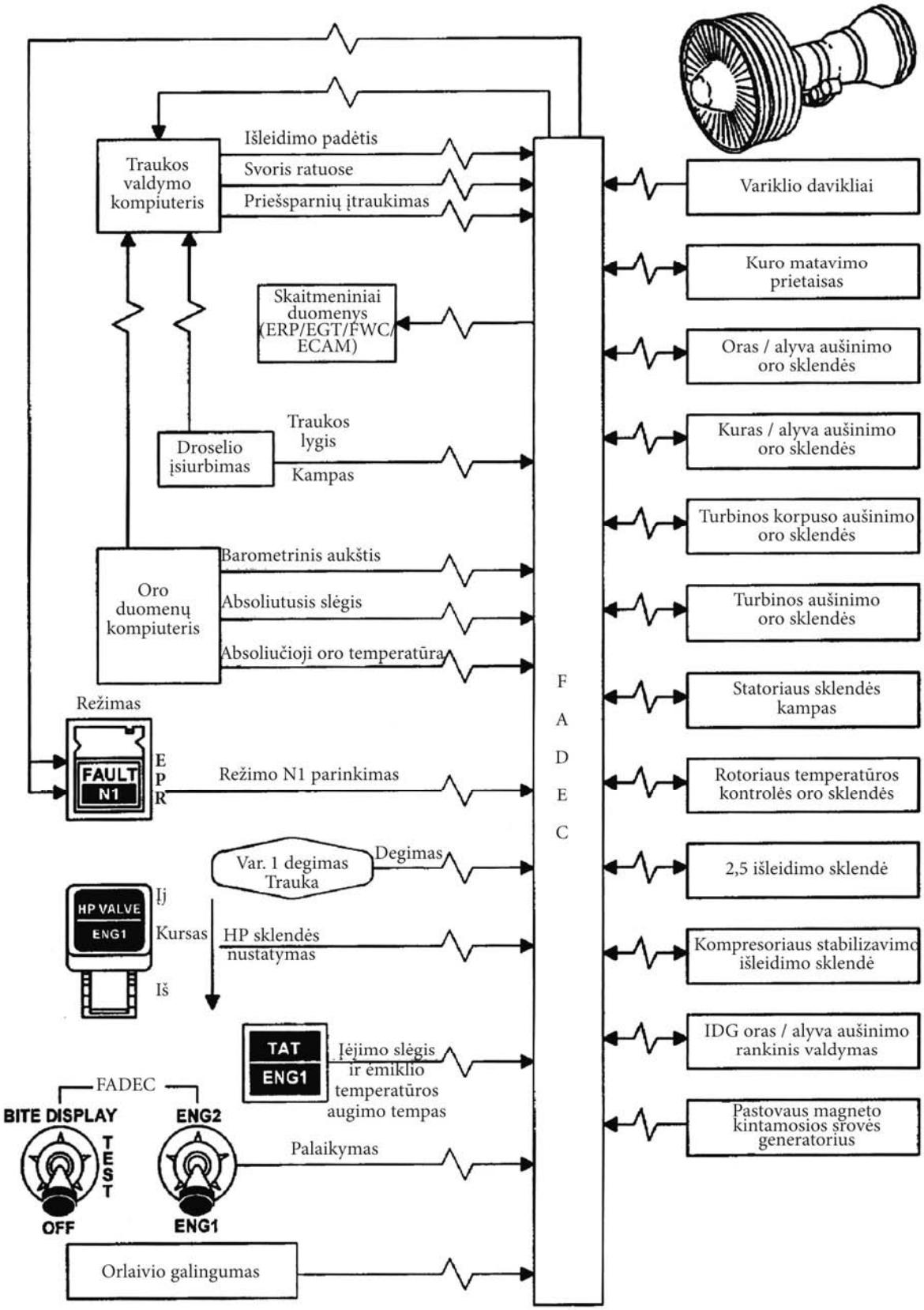
FADEC kompiuteris kaupia informaciją apie variklio veikimą daugelį valandų, todėl galima peržiūrėti, kokie buvo variklio parametrai keletą skrydžių atgal. FADEC kompiuteris lengvai susiejamas su asmeniniu kompiuteriu.

Kitame puslapyje (2.6.1 pav.) parodyta tipinė FADEC sistemos struktūra. Vienas iš pagrindinių FADEC tikslų yra sumažinti orlaivio įgulos apkrovimą, ypač kritinėse skrydžio fazėse. FADEC sistemos logika suprastina traukos lygio nustatymus visoms variklio veikimo operacijų sąlygoms. Traukos svertu nustatytas variklio traukos lygis, nepaisant skrydžio ar aplinkos būsenos, atitinka fiksuotą sverto padėtį. Pavyzdžiui, turimas variklio slėgio santykis EPR, esant tam tikrai aplinkos temperatūrai OAT; jei OAT keičiasi, tai sistema privalo, kad išlaikytų nustatytą EPR, automatiškai priderinti varikliui tiekiamą kuro kiekį.

FADEC sistema nustato variklio galingumo lygį per tiesiogiai valdomą uždarąjį EPR kontrolės kontūrą, kuris yra traukos našumo parametras. Pasirenkamas variklio slėgio santykis EPR paprastai nustatomas kaip priklausomybė nuo traukos rankenos padėties kampo, aukščio, Macho skaičiaus ir absoliučiosios oro temperatūros TAT.

Oro duomenų kompiuteris aprūpina valdymo sistemą pirminiais duomenimis apie: skrydžio aukštį, Macho skaičių ir absoliučiąją oro temperatūrą TAT, tuo tarpu specialūs davikliai tiekia variklio temperatūros, slėgio ir greičio matavimų duomenis. Ši informacija naudojama automatiniam traukos lygiui valdyti, variklio limitavimo apsaugai, trumpalaikei kontrolei ir varikliui paleisti. Valdymo sistema taip

pat realizuoja variklio slėgio santykio EPR programas, kad pasiektų EPR našumą, esant įvairioms traukos lygio nustatymo rankenos kampų pozicijoms, ir suteikia reikiamą našumą, esant pastoviam variklio galios valdymo rankenos kampui, kai keičiamos skrydžio ar išorinės sąlygos.



2.6.1 pav. FADEC sistemos struktūra

Palyginti su mechaninėmis valdymo sistemomis, FADEC turi šiuos privalumus:
– sistema nereikalauja variklio reguliavimo, o tai taupo kurą;
– patobulinto oro išmetimo valdymo dėka, sumažėja kuro sąnaudų;
– sistema pilnai moduliuoja veikiančio variklio klirenso valdymo sistemas, aprūpindama galimybe optimaliai nustatyti turbininio variklio mentelių tarpelius;
– didelis skaitmeninio kompiuterio tikslumas laiduoja gerokai didesnį kartotinį variklio dinamiškumą (t. y. greitėjimo ir lėtėjimo santykį). Tai prailgina variklio nusidėvėjimą;
– sistema realizuoja efektyvesnius variklio paleidimo režimus, panaudodama skaitmenines programas ir logiką, kuri adaptuojasi pagal išorines sąlygas;
– sistema kontroliuoja leistinuosius ir apribojamus variklio parametrų lygius, automatiškai apribodama kritinius variklio slėgius bei greičius. Tiesioginis našumo parametrų valdymas apsaugo nuo neatidaus perforsavimo;
– neutralus variklio greitis išlieka pastovus nepriklausomai nuo išorinių sąlygų ir oro išmetimo reikalavimų kitimo (ko negali atlikti mechaninės sistemos).

FADEC virtualiai apima visas nekintamas ir trumpalaikes būsenų kontroles ir pakeičia daugelį hidromechaninių bei pneumatinių kuro sistemos įrenginių. Kuro sistema išimtinai sumažinta kuro siurblio ir valdymo vožtuvo čiaupo, nepriklausomą automatinio stabdymo įrenginį ir minimizuoja kitus papildomus požymius, kurie reikalingi palaikant variklio saugumą, net atsiradus ilgalaikiam elektronikos gedimui. FADEC taip pat tiekia informaciją į variklio prietaisus bei įgulos įspėjimo sistemas.

FADEC tvirtinama ant variklio kompresoriaus korpuso gesinančiais vibracijas laikikliais ir aušinama oru. 2.6.1 pav. parodyti signalai perduodami tarp variklyje sumontuotų komponentų bei variklio ir orlaivio sąsajų.

Sistema turi sudvejintus elektroninius valdymo kanalus, kurių kiekvienas turi savo procesorių, maitinimą, programinę atmintį, reikiamus įėjimo informacijos daviklius ir valdymo komandų vykdymo įrenginius. Pavarų dėžės dedikuoto variklio sukamas generatorius taip pat tiekia įtampą į kiekvieną elektroninį valdymo kanalą. Jei valdymo galimybė sutrinka pirmajame kanale, tai automatiškai įsijungia antrasis kanalas. Sutrikus pirminės informacijos davikliams pirmajame valdymo kanale, reikiama informacija į pirmąjį kanalą tiekiama iš antrojo kanalo.

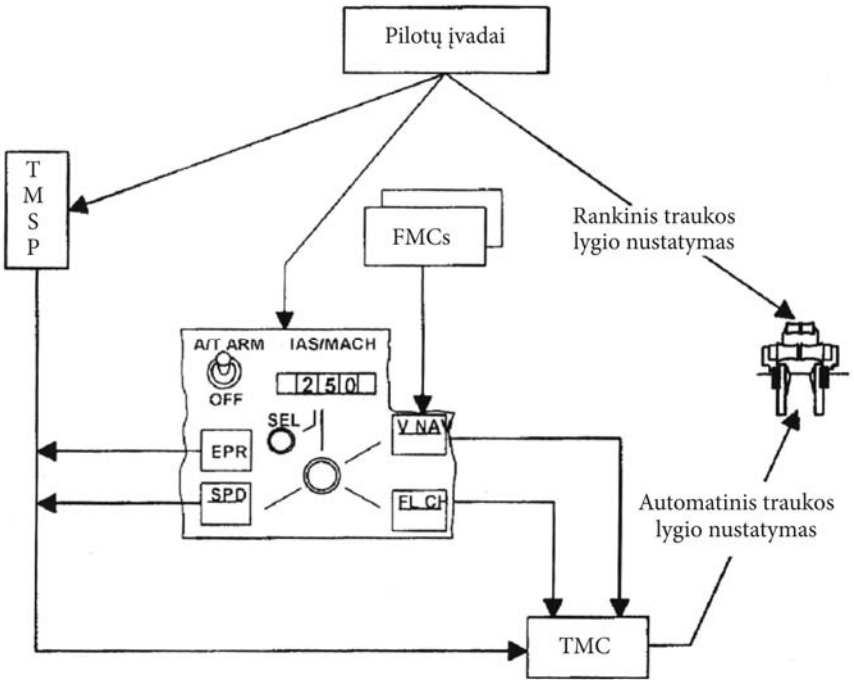
Jei atsitinka taip, kad nustoja veikti abu elektroninio valdymo kanalai, tai sukimo momento varikliai perstatomi į saugią – gedimo padėtį. Kuro srauto tiekimas sumažinamas, statoriaus mentelės nustatomos į pilnai atidarytą padėtį (kad apsaugotų pakilimą), oro ir alyvos aušintuvas pilnai atidaromas ir aktyvus klirenso valdymas išjungiamas.

2.6.6. Automatinė trauka (A/T)

Autotraukos A/T (*Autothrottle*) sistema yra kompiuterio kontroliuojama elektromechaninė sistema, valdanti variklio trauką pagal nustatytus variklio parametrus. Sistema:
– apskaičiuoja ir atvaizduoja EPR ir (arba) N_1 bei greičio (IAS arba MACH) informaciją;
– aprūpina automatinį orlaivio variklių traukos lygio valdymą starto, kilimo, aukštėjimo, kruizinio skrydžio, leidimosi, artėjimo ir tūpimo etapuose.

Traukos padėtis kiekvienam varikliui yra valdoma, siekiant išlaikyti specifinę variklio trauką, atitinkančią parametrus (N_1 ar EPR) ar nustatytą orlaivio orinį greitį visuose skrydžio etapuose, kaip reikalauja traukos valdymo kompiuteris. Moderniuose reaktyviniuose orlaiviuose automatinės traukos sistema dažniausiai įrengiama kuro taupymo sumetimais. 2.6.2 pav. parodyta tipinė automatinės traukos valdymo sistemos struktūra.

Ji turi įvestis iš traukos valdymo kompiuterio TMC (*Trust Management Computer*), kuris integruoja informacinius signalus iš variklių. Traukos būdo pasirinkimo valdymo blokas TMSP (*Trust Mode Select Panel*) ir skrydžio valdymo kompiuteris FMC gauna signalus iš oro duomenų kompiuterio ADC. Su pilnai į priekį nustumta traukos valdymo rankena kompiuteris TMC nustato didžiausią variklio galingumą, neviršydamas nustatytų galios apribojimų kilimo ir ėjimo į kitą ratą metu. Sistema bet kuriuo metu gali būti rankiniu būdu išjungta.



2.6.2 pav. Tipinė automatinės traukos valdymo sistemos struktūra

A/T ir automatinė skrydžio valdymo sistema AFCS veikia kartu, kad išlaikytų reikamą orinį greitį ir vertikalaus kelio profilį. Su įjungta A/T ir autopilotu ar skrydžio vadovu viena ar kita sistema išlaiko nustatytą orlaivio orinį greitį. Kai AFCS režimas valdo orlaivio orinį greitį, tai A/T automatiškai valdo reikalingą variklio traukos vertę. Kai AFCS režimas valdo orlaivio vertikaliojo skrydžio kelią, tai A/T automatiškai palaiko reikiamą orinį greitį ir traukos lygį.

AIRBUS orlaivių varikliai dažniausiai yra valdomi FADEC, bet alternatyviai naudojami ir elektriniai traukos valdymo signalai, leidžiantys eliminuoti silpnas vietas paprastose automatinėse traukos valdymo sistemose su mechaniniu valdymu. Šiuose orlaiviuose variklio traukos lygio valdymo rankenos padėtis automatiškai nekeičiama, taip didinant sistemos patikimumą.

AIRBUS orlaivių traukos valdymo sistemos veikai rankiniu arba automatiniais valdymo režimais. Rankinio traukos valdymo režimo metu orlaivio įgula nustumia rankeną į padėtį tarp laisvosios ir pilnosios traukos, o automatinio traukos valdymo režimo metu traukos lygio valdymo rankena yra nustatoma į konkrečią padėtį pagal maksimalų esamos traukos lygį. Nepaisant, kad naudojamas rankinis ar automatinis būdas, variklio greičio ir galios pokyčiai yra parodomi per N_1, IAS greičio tendencijas.

Traukos valdymo rankenos veikimas. Automatinė traukos valdymo sistema perstumia traukos lygio nustatymo rankenas, kartu reaguodama į generuojamus klaidų signalus, ir palygina esamas orlaivio skrydžio sąlygas prieš pasirinktus dydžius. Daugumoje orlaivių rankenos gali būti perstatomos bet kuriuo metu be automatinio traukos išjungimo.

Pastaba. AIRBUS ***fly-by-wire*** tipo orlaiviuose traukos rankenos sklendė yra fiksuotoje padėtyje ir negali būti pakeista.

2.6.7. Traukos valdymas automatine traukos valdymo sistema

Automatinė traukos valdymo sistema veikia atsižvelgdama į skrydžio įgulos valdymo pulto režimo įvestis iš automatinės skrydžio valdymo sistemos AFCS ar alternatyviai veikia per automatines FMC komandas. Automatinė traukos valdymo sistema:

– naudoja traukos lygio apribojimų informaciją, apskaičiuotą FMC;
– valdo traukos rankenų padėtį;
– valdo traukos lygių palyginimus per variklio parametrų kontrolės prietaisus.

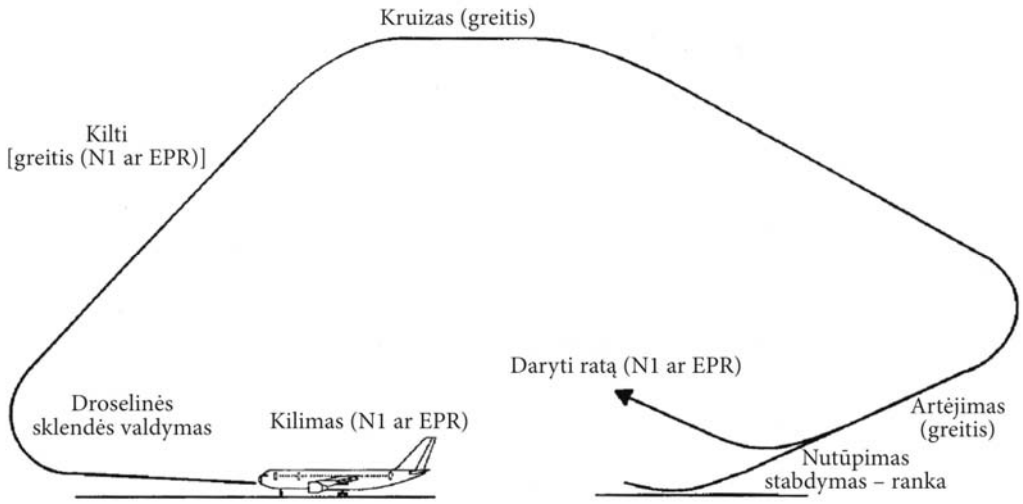
FMC apskaičiuoja traukos lygio duomenis šiems tipiniams skrydžio režimams:

– pakilimas;

– sumažintas pakilimas;
– manomosios temperatūros didėjimas;
– aukštėjimas;
– sumažintas aukštėjimas;
– kruizas;
– ėjimas į antrąjį ratą.

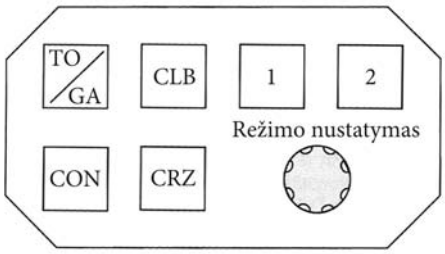
Traukos valdymo kompiuteris (TMC) valdo traukos rankenas, atsižvelgiant į rankinius impulsus iš traukos režimo parinkimo skydelio (TMSP), automatiškai valdo iš skrydžio valdymo kompiuterio (FMC), kai jis veikia VNAV režimu.

Pagrindinės TMC funkcijos yra šios:
– apskaičiuoti traukos apribojimus (naudojant išorės slėgį ir temperatūrą) ir traukos nustatymus arba sekti FMC traukos komandas;
– automatiškai valdyti tris pagrindinius režimus (EPR, Macho skaičiaus ir greičio palaikymo) įvairiose skrydžio fazėse, kaip parodyta 2.6.3 pav.;
– aptikti ir persiųsti A/T klaidas.



2.6.3 pav. Traukos valdymas įvairiose skrydžio fazėse

Traukos režimo pasirinkimo skydelis (TMSP) (2.6.4 pav.) leidžia:
– pasirinkti TO/GA, CLB, CON, CRZ traukos nuorodų režimus;
– pasirinkti temperatūros normos sumažinimą, kad būtų prailgintas variklio veikimas.



2.6.4 pav. Traukos režimo skydelis

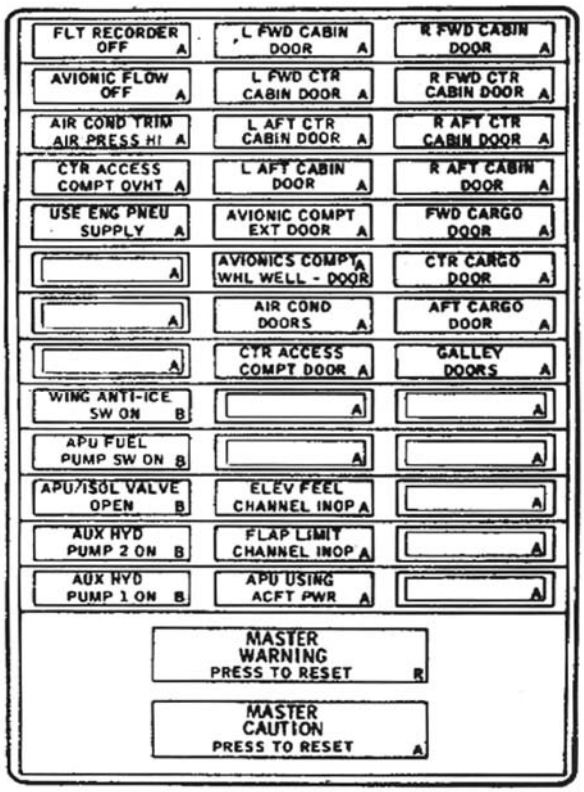
Orlaiviui kylant, automatinio traukos valdymo sistema nustato reikalingą variklio galią ir rodo ją traukos režimo pasirinkimo skydelyje (2.6.4 pav.) TO ir TOGA per FMA (skrydžio režimo signalizatorius), kuris priklauso EADI tokį laiką, kol pakilimo greitis viršys 80 mazgų (150 km/val.). Greičiui padidėjus per 80 mazgų, automatinės traukos režimas pasikeičia į traukos palaikymo režimą (THR HOLD) ir pakeičiama indikacija ekrane EADI iš TO į THR HOLD. Traukos palaikymo režimas išlaiko pakilimo traukas, bet nekeičia traukos lygio valdymo rankenos padėties, leisdamas įgulai vykdyti pilną traukos

kontrolę, jei ji reikalinga. Šis režimas naudojamas traukos informacijai automatiškai pakeisti, esant tam tikriems skrydžio režimams, kai yra pasirenkamas skrydžių valdymo sistemos režimas FMC ir ekrane rodomas traukos informacijos režimas.

2.7. Įspėjamieji ir registracijos įrenginiai

2.7.1. Centrinė įspėjimo sistema

Šiuolaikiniuose orlaiviuose daugybei sistemų reikalinga pastovi kontrolė, kuriai savo ruožtu reikalingas tam tikras kiekis įspėjančiųjų prietaisų: tiek regimųjų, tiek girdimųjų. Siekiant išvengti orlaivio įgulos dėmesio blaškymo, šie įspėjimai sukoncentruoti Centrinėje įspėjimo sistemoje (*Central Warning System*), kurios tipinė pranešimų šviestelė parodyta 2.7.1 pav.



2.7.1 pav. Centrinės įspėjimo sistemos pranešimų šviestelė, įspėjimų šviesos:
A – geltona (gintarinė); B – mėlyna; R – raudona

Sistemos pagrindas susideda iš grupės įspėjamųjų ir signalinių indikatorių, prijungtų, kad signalizuotų uždarosios grandinės gedimus bei gaunamą informaciją apie įvairias orlaivio sistemas. Kiekvienas šviestelės indikatorus rodo tam tikrą įspėjimą, reikšdamas sistemos veikimo sutrikimą ar konsultacinę žinutę. Šviestelės indikatoriai yra raudoni, geltoni (gintariniai) ar mėlyni, kurie praneša apie sistemos sutrikimą ir jo laipsnį. Įspėjimo sistemos pranešimų šviestelės skydelis dažniausiai įrengiamas centriniame valdymo pulte, kaip parodyta 2.7.1 pav. Taip pat papildomas pranešimų šviestelės skydelis gali būti įrengtas tuose orlaiviuose, kur yra skrydžio inžinierius.

Įspėjamieji įrenginiai garso ir šviesos signalais informuoja pilotus apie orlaivio prietaisų ir sistemų gedimus bei pavojingas situacijas skrendant, kai reikia atlikti tam tikrus orlaivio valdymo veiksmus ar nedelsiant atkreipti į ką nors dėmesį.

Orlaivio įspėjimo sistemos šviesos signalai yra trijų svarbos lygių. Šviesos ir garso signalai gali atsirasti kartu arba atskirai. Raudonais šviesos signalais įspėjama apie gaisrą varikliuose, pagalbinėje jėgainėje ir važiuoklėse, autopiloto išjungimą, važiuoklės valdymo gedimą ar kitą avarinę situaciją orlaivyje. Įspėjimai

apie netinkamą orlaivio prietaisų ir sistemų veikimą, į kuriuos pilotai nedelsiant turi atkreipti dėmesį, pateikiami geltonos spalvos signalais. Siekiant didesnio piloto dėmesio į šiuos signalus, jie gali blykčioti.

Mėlynos spalvos indikatoriai rodo pilotams, kad elektros energija tiekiama normaliai, kad veikia vožtuvai ir kiti prietaisai, kad juos kviečia ryšiui palydovai ar techninis personalas, ir t. t. Be to, mėlynos spalvos indikatoriai parodo kokį nors sistemų nesuderinamumą, nesutapimą ar, pavyždžiui, tiesiog trumpalaikį vožtuvo nesandarumą. Mėlynos spalvos indikatoriai nereikalauja iš karto atkreipti į juos dėmesio, jie garso signalais nedubliuojami.

Jei sistemoje įvyksta klaida, klaidą juntantis prietaisas papildomai perduoda signalą į elektroninį prietaisą, vadinamąjį „Logikos kontrolerių“, kuris nustato, ar klaida yra pavojinga ir rizikinga, ar yra tokia, kuri tiesiog reikalauja apdairumo. Jei klaida laikoma pavojinga, kontrolerius jungia raudoną įspėjimo šviesą. Kai tiesiog reikalingas didesnis atsargumas, signalas šviečia geltona įspėjimo šviesa.

Kiekvienas įspėjantis indikatorius sujungia jungiklių sekciją, kad, jei indikatorių dangteliai yra įspausti, aktyviosios signalo grandinės atsijungtų ir indikatoriai užgestų. Šis veiksmas taip pat vėl nustato pagrindinę įspėjimo sistemos būseną, kad ji galėtų priimti kitų klaidų, kurios galėtų įvykti kitose orlaivio sistemose, signalus.

Sistemos švieslentės indikatoriai lieka šviesti, kol sistemos klaida pataisoma. Švieslentės indikatorių pritemdymas ir lempų siūlų patikra paprastai atliekama jungikliais, įtaisytais greta pranešimo skydelio.

Garsiniai signalai reikalingi, kad pilotas greičiau atkreiptų dėmesį į šviesos signalus. Jie sklinda iš sirenos, garsiakalbių, skambučių ir zirzeklių ir būna trijų rūšių: sirena, toniniai ir balsas. Sirena girdima, kai veikia gaisro signalizacija. Toniniai signalai kabinoje girdisi, kai krinta slėgis (daug trumpalaikių garsų), kai pilotas nepasirengęs kilti ar tūpti (nuolatinis garsas), kai orlaivis artėja ar nukrypsta nuo skrydžio lygio, kai pilotą kviečia ryšiui asmeninio iškvietimo sistema „Selkol“, ir t. t. Kai viršytas leistinasis Macho greitis, girdimas traškantis garsas. Signalai savaime nutyla, kai sistemoje pašalinama jį sukėlusi priežastis, gaisro sirena nutildoma nuspaudus indikatorių *Master warning*.

Kompiuterio atmintinėje įrašytu balsu pilotus įspėja Žemės artėjimo įspėjamoji sistema GPWS ir susidūrimų vengimo sistema TCAS.

Įvairūs garsiniai signalai orlaivyje įspėja įgulą, jei egzistuoja kokia nors įspėjimo priežastis. Štai keletas tipinių priežasčių, sukeliančių garsinius įspėjimo signalus:

– klaksėjimo garsas atsiranda, jei viršijamas skrydžio greičio limitas;
– įspėjimo tonas skamba, jei atjungtas autopilotas;
– nutrūkstantis garsinis signalas skamba, jei viršytos orlaivio aukščio ribos;
– pastovus garsinis signalas skamba, jei problema egzistuoja orlaivio važiuoklėje;
– nutrūkstantis garsinis signalas skamba, jei klaidinga kilimo konfigūracija;
– ugnį įspėjantis skambutis skamba, jei egzistuoja ugnis;
– Žemės artėjimo įspėjimą ir pavojus lydi garsinis įspėjimas.

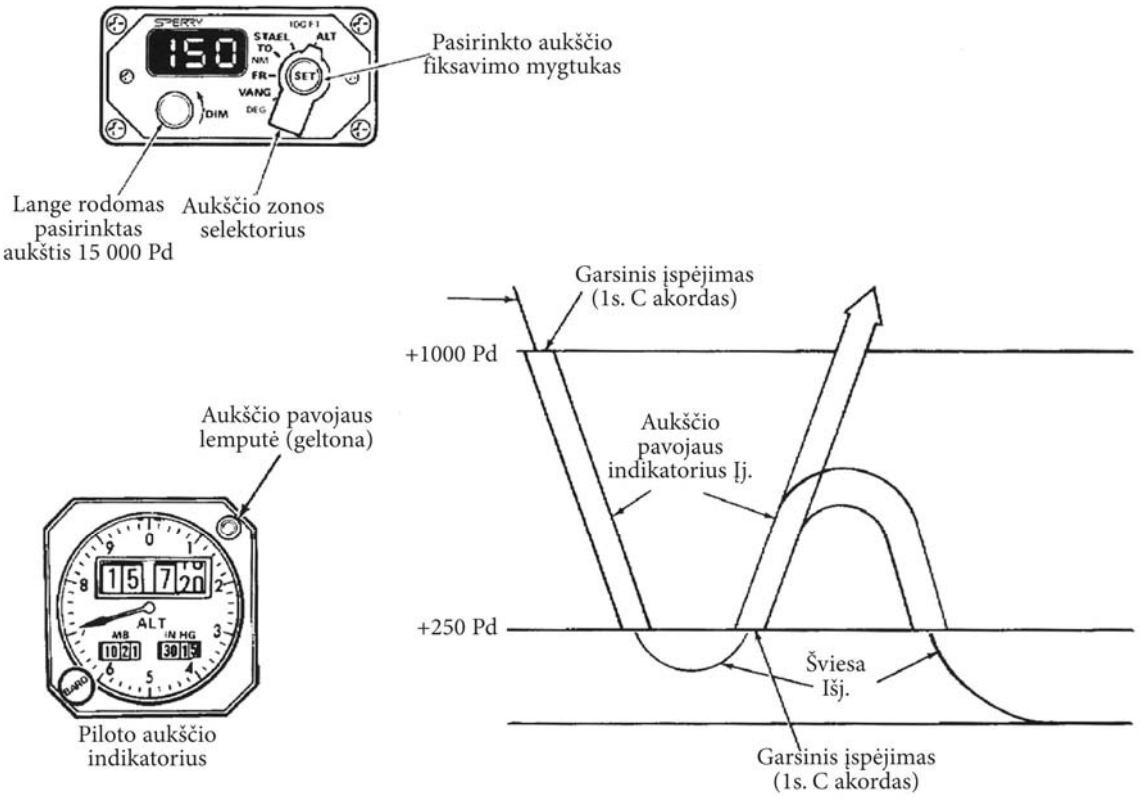
2.7.2. Aukščio pavojaus įspėjimai

Aukščio pavojaus sistema (*Altitude Alerting System*) atkreipia pilotų dėmesį tiek garsiniais, tiek vaizdiniais įspėjimais, orlaiviui pasiekus ar nukrypus nuo iš anksto pasirinkto aukščio, pagal informaciją, gaunamą iš slėginio aukščiamačio ar oro duomenų kompiuterio (ADC).

Renkantis norimą aukštį valdymo pulte, signalas iš aukščio daviklio lyginamas su signalu aukščio nustatymo valdymo pulte. Kai tikrasis aukštis ir nustatytasis aukštis yra skirtingi, egzistuoja signalų skirtumas.

Pavyzdžiui (2.7.2 pav.), įvykių seka, vykstanti leidžiantis nuo 31 000 pėdų į 15 000 pėdų, yra štai tokia:

– prieš paliekant 31 000 pėdų aukštį, valdymo bloke nustatomas 15 000 pėdų aukštis, sistema šiuo atveju neduoda jokio signalo, kadangi signalai pakankamai skirtingi;
– maždaug likus 1000 pėdų iki nustatyto aukščio, garsinis įspėjimas skamba (C akordu) maždaug vieną sekundę, ir aukščio pavojaus šviesa šviečia gretimai kiekvieno pirminio aukščiamačio;
– šviesa lieka šviesti, kai lieka maždaug 250 pėdų iki tikslo;
– jei orlaivis skrenda aukščiau kaip 250 pėdų nei nustatyta ar nužemėja 250 pėdų žemiau nustatyto aukščio, vėl skamba garsinis įspėjimas ir šviečia indikatorius.



2.7.2 pav. Skrydžio lygio įspėjamieji signalai

Ta pati įvykių seka vyksta kylant į norimą aukštį. Aukščio pavojus yra nuslopintas, kai užsparniai užima leidimosi poziciją ar kai yra užfiksuota leidimosi trajektorija.

Skrydžio metu orlaiviai privalo laikytis nurodyto aukščio, jei to reikalauja skrydžio programa. Aukščiai, kuriuose skraido orlaiviai, suskirstyti į intervalus (lygius). Skrydžio programoje nurodomi aukščio lygiai, kurių pilotai privalo laikytis, ir kada juos reikia keisti. Skrydžio aukščių suskirstymu nustatytais lygiais siekiama išvengti pavojingų orlaivių suartėjimų ir jų susidūrimų. Aukščio lygiai numeruojami iš apačios į viršų. Vakarų Europoje nuo 2002 m. vertikaliojo skirstymo minimumas orlaiviams, skrendantiems žemiau kaip 410 skrydžio lygio imtinai, yra 1000 pėdų, arba 300 m. Nuo 430 skrydžio lygio vertikaliojo skirstymo minimumas lieka 2000 pėdų (600 m), bet ateityje gali būti sumažintas.

Suskirstant aukštį lygiais, naudojamas 760 mm Hg, arba 1013,2 milibarų slėgis, nustatytas barometriniame aukščiamatyje. Statinis oro slėgis kinta proporcingai aukščiui, todėl skrendant virš kalnų ir daubų išlieka tas pats skrydžio lygis.

Skrendant nurodyto skrydžio lygio laikomasi, pakilus iki nurodyto aukščio H_S, stebint barometrinį aukščiamatį ir valdant orlaivio polinkį taip, kad nenukryptų nuo nustatyto aukščio aukštyn arba žemyn daugiau kaip 60 m. Ilgai skrendant, toks nuolatinis aukščio palaikymas vargina pilotus, todėl skrydžio metu pasirinktąjį aukštį palaiko autopilotai. Orlaivio automatinės skrydžio valdymo sistemos FMS gali jį keisti pagal skrydžio programą. Valdant orlaivį kabinos vairais arba blogai veikiant autopilotui, apie prasidėjusią nuokrypą nuo pasirinktojo aukščio pilotus įspėja skrydžio lygio pavojaus sistemos. Jos įspėja pilotus garso ir šviesos signalais, kada orlaivis artėja prie pasirinktojo aukščio (skrydžio lygio) arba kada nuo jo nukrypsta. Aukštis (barometrinis) nustatomas arba atskirame įspėjimo sistemos valdymo pulte, arba skrydžių valdymo sistemos pulte, kai į ją įeina skrydžio lygio įspėjimo sistema.

Kai artėjant prie pasirinktojo aukščio iš viršaus ar iš apačios lieka 150 m, trumpai suskamba garso signalas pilotų kabinoje ir užsidega šviesos indikatoriai. Priartėjus iki pasirinktojo aukščio 60 m nuotoliu, signalizatoriai užgęsta. Kai orlaivis nukrypsta į kurią nors pusę nuo pasirinktojo aukščio 60 m, trumpai pasigirsta garso signalas ir šviesos indikatotiai blykčioja, kol orlaivis sumažina aukščio nuokrypą mažiau kaip 60 m arba kol aukščio nuokrypa viršys 150 m, arba kai bus nustatytas kitas pasirinktasis aukštis valdymo pulte. 2.7.1 pav. parodyta, kaip sistema įspėja pilotus orlaiviui kertant pasirinktąjį aukštį iš apačios.

2.7.3. Žemės artėjimo įspėjimo sistema

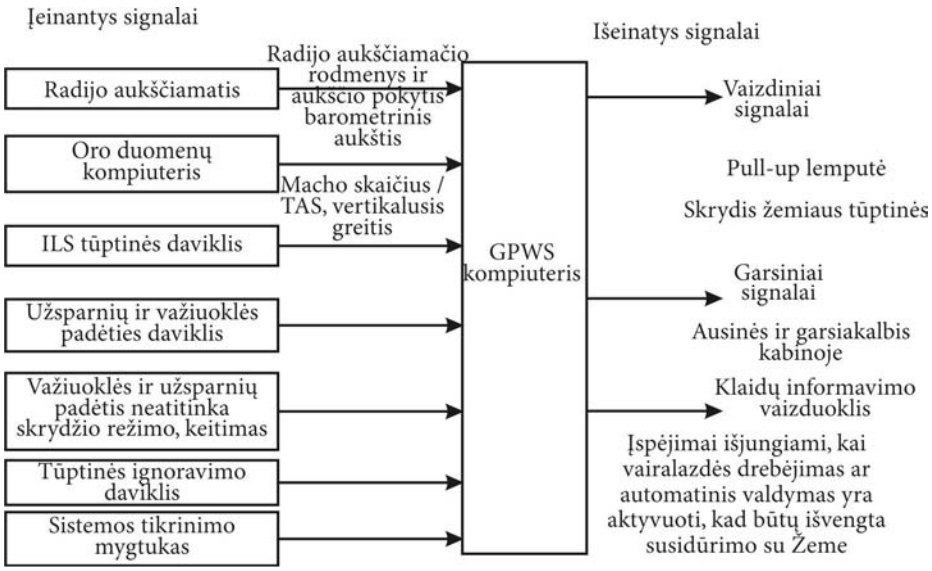
Daugiausia keleivinių orlaivių avarijų nutinka tada, kai orlaivis užeina tūpti arba perdaug nužemėja, – iškyla pavojus pavojingai suartėti su Žeme. Priežastys gali būti įvairios: piloto neatidumas, išsiblaškymas, sumišimas skrydžio metu, apsvaigimas, klaidingas prietaisų rodmenų supratimas, dezorientacija erdvėje ir blogo matomumo sąlygos. Siekiant išvengti tokio pobūdžio nelaimių, buvo sukurta ir nuo 1975 m. pradėta diegti sistema, įspėjanti pilotus apie pavojingą orlaivio artėjimą prie Žemės. Ji vadinama pavojingo artėjimo prie Žemės įspėjimo sistema. GPWS (*Ground Proximity Warning System)* skirta informuoti įgulą specialiu garsiniu ir vaizdiniu signalu, jei tik iškyla pavojus pavojingai suartėti su Žeme. Ypač GPWS sistema naudinga leidžiantis oro uostuose, kuriuos supa didesnės kalvos ar kalnai, esant blogam matomumui ir kai pilotai gerai nesusipažinę su oro uostų prieigomis. Sistema taip pat įspėja pilotus, kai orlaivis skrenda žemai ir prieš jį kyla Žemės paviršius, taip pat kada orlaiviui leidžiantis yra per dide1ė nuokrypa nuo tūptinės arba kada jo leidimosi greitis yra per didelis.

GPWS sistema nuolat stebi orlaivio radijo aukščiamatį, oro duomenų kompiuterį (*Air Data Computer*) ir bet kokį barometrinį aukščio pokytį tam, kad būtų žinomas tikslus orlaivio aukštis virš Žemės bei aukštėjimo ir žemėjimo sparta. Duomenys yra nuolat apdorojomi sistemoje, jei užfiksuojamas pavojingai staigus orlaivio artėjimas prie Žemės, tipinėje GPWS sistemoje užsidega raudona PULL-UP lemputė kartu su pasigirstančia garsine komanda „WHOOP WHOOP PULL-UP“. Įgulai nedelsiant ištaisius pavojingą situaciją, įspėjamieji signalai ir komandos išsijungia ir sistema automatiškai vėl pereina į budėjimo režimą.

Svarbu žinoti, kad GPWS sistema **nesugeba** įspėti apie staigiai artėjančią kliūtį priešais orlaivį (kalnas, uola). Taip pat sistema **neįspėja** orlaivio įgulos, kai orlaivis leidžiasi įdealia tūptine, apie galimą per trumpą kilimo tūpimo taką, jei aerodromas neturi ILS sistemos. GPWS sistema paprastai yra aktyvi 50–2450 ft (pėdų) ribose virš Žemės paviršiaus priklausomai nuo radijo aukščiamačio rodmenų.

Išjungti GPWS sistemos skrydžio metu negalima (pavyzdžiui, ištraukiant saugiklius), išskyrus tik atvejus, kai sistema turi būti patikrinta tam tikrose antžeminių tarnybų aerodromuose, kada atliekami orlaivio reglamentiniai techninės priežiūros darbai.

GPWS sistemos architektūra. GPWS susideda (2.7.3 pav.) iš centrinio procesoriaus (CP), kuris priima duomenis iš įvairių daviklių, nuolat juos apdoroja ir pagal algorimus sprendžia, ar yra susidūrimo su Žeme rizika. Nustačius, kad tokia rizika yra, generuojami tam tikri garsiniai ir vaizdiniai perspėjimai bei komandos. Bet koks GPWS centrinio valdomojo bloko gedimas ar bet koks netikslus duomenų gavimas iš daviklių yra parodomas GPWS prietaisų lentoje.



2.7.3 pav. Žemės artėjimo įspėjamosios sistemos (GPWS) architektūra

Be to, GPWS sistema turi pilnai intergruotą savaiminio pasitikrinimo funkciją, kuri leidžia patikrinti signalo kelią iš visų informacijos daviklių iki procesoriaus. Jei atleidžiant savaiminio testavimo mygtuką visi davikliai veikia ir siunčia teisingus duomenis į kompiuterį, sistema akimirksniu pervedama į pareng-

ties būseną ir prireikus yra pasiruošusi generuoti garsines komandas bei vaizdinius perspėjimus. Svarbu žinoti, kad savaiminis tikrinimas paprastai yra ***draudžiamas*** orlaiviui esant ore.

Vienas iš pagrindinių prietaisų, tiekiančių informaciją sistemai, yra radijo aukščiamatis. Jis matuoja aukštį iki Žemės paviršiaus. Sistema dar gauna signalų iš vertikaliojo greičio matuoklio, barometrinių aukščiamačių ir greičio matuoklių, inercinės sistemos, važiuoklės padėčių daviklių ir kitų sistemų. Pagrindinis GPWS privalumas tas, kad ji įspėja pilotus anksčiau, kad jiems užtektų laiko išvengti avarijos.

Tai daro kompiuteris, analizuojantis gautus iš orlaivio prietaisų signalus ir jų kitimo greičius. Pilotai įspėjami šviesos signalais ir balsu (2.7.2 pav.), sutartinėmis frazėmis. Balso signalus formuoja kompiuteris ir siunčia juos į orlaivio vidaus ryšio sistemą, o iš jos – į kabinos garsiakalbį.

GPWS darbo režimai. Skiriamos keturios pagrindinės sąlygos, sukeliančios garsinius ir vaizdinius įspėjimus įgulai. Šios keturios sąlygos apibrėžiamos kaip keturi GPWS veikimo režimai:

Režimas 1 Per didelis žemėjimo greitis žemiau 2450 ft (pėdų).

Režimas 2 Per didelis suartėjimas su Žeme:
- esant kruizinio skrydžio režimui;
- esant leidimosi režimui.

Režimas 3 Aukščio praradimas po T/0 arba per netikslų užėjimą tūpti.

Režimas 4 Nesaugus suartėjimas su vietove, kur yra kliūčių, jei orlaivis ne leidimosi režime ir yra žemiau nei:
- 500 ft AGL (virš Žemės paviršiaus) su neišleista važiuokle;
- 200 ft AGL su leidimuisi nenustatytais užsparniais.

Kiti galimi režimai:

Režimas 5 Per didelis nužemėjimas nuo ILS tūptinės.

Režimas 6 Garsiniai aukščio pranešimai užėjimo tūpti metu, taip pat ir apsisprendimo aukštis (DH).

Režimas 7 Vėjo poslinkio aptikimas, perspėjimas ir tolesni nurodymai.

Kaip priedą prie radijo aukščiamačio ir oro duomenų kompiuterio duomenų, GPWS centrinis procesorius gauna informacijos ir iš šių papildomų šaltinių:

- **Pagrindinės važiuoklės padėties parinkimas:** važiuoklės padėtis lemia, ar aktyvuojasi, ar ne **REŽIMAS 3**, ir nulemia barometrinio aukščio žemėjimo greičio sąlygas, kurios aktyvuoja **REŽIMĄ 4.**
- **Užsparnių padėties parinkimas:** užsparnių padėtis lemia, ar **REŽIMAS 3** aktyvuojasi, ar ne, ir nulemia barometrinio aukščio staigaus suartėjimo su Žeme, kuris aktyvuoja **REŽIMĄ 2,** ir barometrinio aukščio žemėjimą, kuris aktyvuoja **REŽIMĄ 4.**
- **ILS imtuvas: REŽIMAS 5** matuoja tūptinę ir nuokrypą nuo jos laipsniais.
- **Apsauga nuo smukos:** įrenginiai, apsaugantys orlaivį nuo smukos, yra įrengti jame (vairalazdžių drebėjimas ir automatinis jų lenkimas). Jie taip pat siunčia signalus į GPWS procesorių tam, kad slopintų kitus pranešimus, jei tik orlaiviui iškyla smukos pavojus.

Įspėjimų sistema. Esama įranga orlaivyje generuoja garsinius ir vaizdinius perspėjimus tam, kad būtų išvengta staigių ir pavojingų menevrų. Pirminiai vaizdiniai ir garsiniai signalai skirti įgulai, kad ši būtų pasiruošusi išvengti tikro pavojaus, apie kurį sistema perspėja ir informuoja, todėl įgula privalo nedelsiant reaguoti, išvesdama orlaivį iš pavojingos situacijos ar paruošdama jį atatinkamam skrydžio režimui tam, kad perspejimai liautųsi. Jei įgula ignoruoja bent vieną iš pavojaus signalų, jie nenustoja veikti iki tol, kol orlaivis nebus išlygintas ir kildamas maksimaliu tempu pasieks minimalų saugų aukštį. Orlaiviuose, kuriuose yra sumontuota patobulinta GPWS sistema, perspėjimą apie pavojų reikia patvirtinti prieš pradedant staigų kilimą aukštyn. Tiek bazinės, tiek ir patobulintos GPWS sistemų garsiniai pranešimai apie pavojų yra apibendrinti 2.7.1 lentelėje.

Pavojaus signalas **Režime 5** susideda iš pastoviai šviečiančios geltonos lemputės ir garsinio pavojaus signalo *Glide Slope*, kurie tampa tuo dažnesni, kuo didesnė tampa nuokrypa žemiau tūptinės ir taip pat tampa garsesni jei nuokrypa viršija ribas tarp dviejų taškų žemiau 300ft (pėdų).

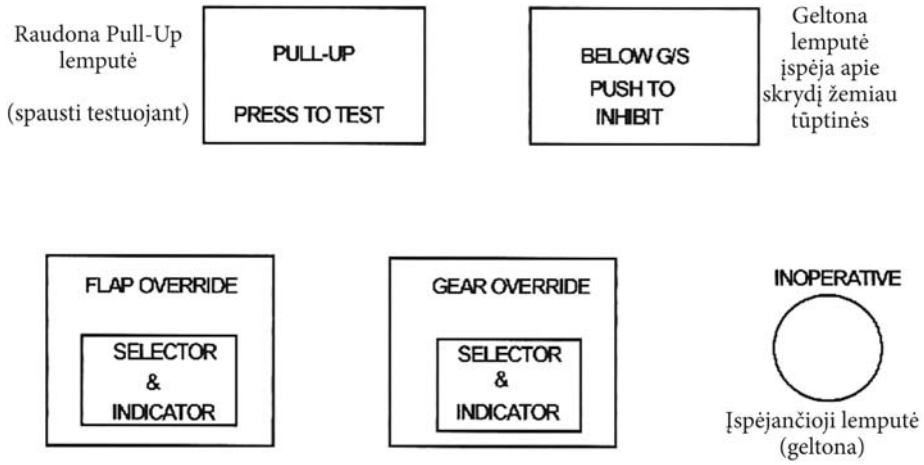
GPWS prietasų lenta. GPWS pavojaus ir įspėjimo šviesos kabinos prietaisų lentoje yra išdėstytos pagal šią schemą (2.7.4 pav.).

Paspaudžiant PULL-UP lemputę, sistema pasitikrina ar viskas funkcionuoja pagal reikalavimus, dėl to pradeda degti PULL-UP, BELOW GLIDE SLOPE ir INOP šviesos, pasigirsta garsiniai perspėjimai. Švie-

sinis signalas INOP taip pat įsižiebia, jeigu nutrūksta elektros tiekimas, sistema nustoja veikti ar nutrūksta duomenų srautas iš bet kurio daviklio.

2.7.1 lentelė. GPWS sistemų garsiniai pranešimai apie pavojų

GPWS režimas			**Bazinė įranga**		**Patobulinta įranga**	
			Pavojaus signalas	Perspėjimas	Pavojaus signalas	Perspėjimas
1	Per staigus žemėjimas	50–2450	–	Whoop Whoop Pull-up	Sink Rate Sink Rate	Whoop Whoop Pull-up
2	Per staigus suartėjimas su Žeme 2B kruizmo režime	50–2450	–	Whoop Whoop Pull-up	Terrain Terrain	Whoop Whoop Pull-up
	Per staigus suartėjimas su Žeme 2B, esant tūpimo režimui	200–790	–	Whoop Whoop Pull-up	Terrain Terrain	Whoop Whoop Pull-up
3	Aukščio praradimas po pakilimo arba nuėjimas į II ratą	50–700	–	Whoop Whoop Pull-up	Don‘t Sink	
4	4A Artėjimas prie Žemės su neišskleista važiuokle	50–500	–	Whoop Whoop Pull-up	Too Low Flaps	Too Low Terrain
	4B Artėjimas prie Žemės su neišleistais užsparniais	50–200	–	Whoop Whoop Pull-up	Glide Slope	Too Low Terrain
5	Skrydis žemiau tūptinės	50–1000	Glide slope	–	Minimums	–
6	Skrydis žemiau minimumų	50–1000	–	–	Windshear	–
7	Vėjo poslinkio pavojus	–	–	–		–



2.7.4 pav. Žemės artėjimo įspėjamosios sistemos prietaisų švieslentė

Užsparnių išleidimo ne pagal instrukcijas jungiklis GPWS prietaisų lentoje taip pat turėtų būti naudojamas tada, kai nestandartinės, užėjimo tūpti ar tūpimo situacijos metu panaudojama užsparnių padėtis, neatitinkanti normalių darbo režimų, taip bus išjungti perspėjimo signalai dėl netinkamai išleistų užsparnių padėties, įsižiebs signalas FLAP OVERRIDE. Tas pats galioja ir pagrindinei važiuoklei, bus išjungti pavojaus signalai, jei orlaiviui dėl gedimo tektų leistis su nevisiškai išleista važiuokle, tuomet įsižiebs ženklas GEAR OVERRIDE.

Savarankiškas reagavimas pagal galimybes. Nepaisant to, kokia GPWS įranga – bazinė ar patobulinta sumontuota orlaivyje, įrangai užfiksavus pavojaus signalą ar pranešimą, privalu nedelsiant reaguoti. Perspėjimas apie pavojų kartais gali būti suprastas kaip pavojaus signalas ir orlaivio vadas turi teisę reaguoti savo nuožiūra tik esant tokioms sąlygoms:

– jei vykdomi skrydžiai tokiomis sąlygomis, jog orlaivis nėra priartėjęs prie debesų horizontaliai per 1 nm ir vertikaliai 1000 ft, o matomumas yra ne mažesnis negu 5 nm;

– jeigu orlaivio vadas aiškiai suvokia, jog orlaivis NĖRA pavojingoje situacijoje Žemės atžvilgiu galimo staigaus menevro metu ar tam tikroje orlaivo padėties konfigūracijoje.

Pastaba. Nors kai kurie GPWS įrangos gamintojai savo literatūroje gali rašyti, kad TOO LOW TERRAIN yra pavojaus signalas, JAA požiūriu reagavimas į šį signalą turėtų būti toks pat kaip ir į įspėjimą apie pavojų.

Įspėjimo blokavimas. Režimo 5 indikacija gali būti užblokuota – grįžęs signalas (*back beam*), kuris paprastai sukeltų pavojaus signalą, gali būtį nefiksuojamas. Blokavimas pasiekiamas nuspaudžiant geltonos spalvos lemputę, šitoks blokavimas veikia tik esant aukščiau kaip 300 ft. Visais kitais atvejais įspėjimas liaunasi tik iškopus iš pavojingos zonos. Mygtuko, kuris vykdytų on ir off funkciją, nėra. Jokiu būdu negalima tildyti įspėjimo, ištraukiant saugiklį.

Pranešimas apie GPWS suveikimą. Būtina informuoti atsakingą valdžią apie GPWS suveikimą, užpildant standartines pranešimo formas. Tai reikia padaryti ir tada, kai GPWS nesuveikė, nors buvo tokios aplinkybės, kad turėjo suveikti.

GPWS veikimo ribos. Standartinių GPWS veikimas bus apibūdintas kitose pastraipose. Kartais pasitaiko skirtingų sąlygų tarp skirtingų gamintojų, pavyzdžiui, *Boeing 737-400* apatinė veikimo zonos riba yra 30 pėdų, o pagal JAA standartus veikimo zona tęsiasi nuo 50 iki 2450 pėdų.

Visi orlaivio artėjimo prie Žemės atvejai, išskyrus tūpimą, yra pavojingi. Kokie yra šie atvejai, priklauso nuo GPWS konstrukcijos ir nuo to, kokiame orlaivyje ji yra. Šie atvejai gali būti tokie:

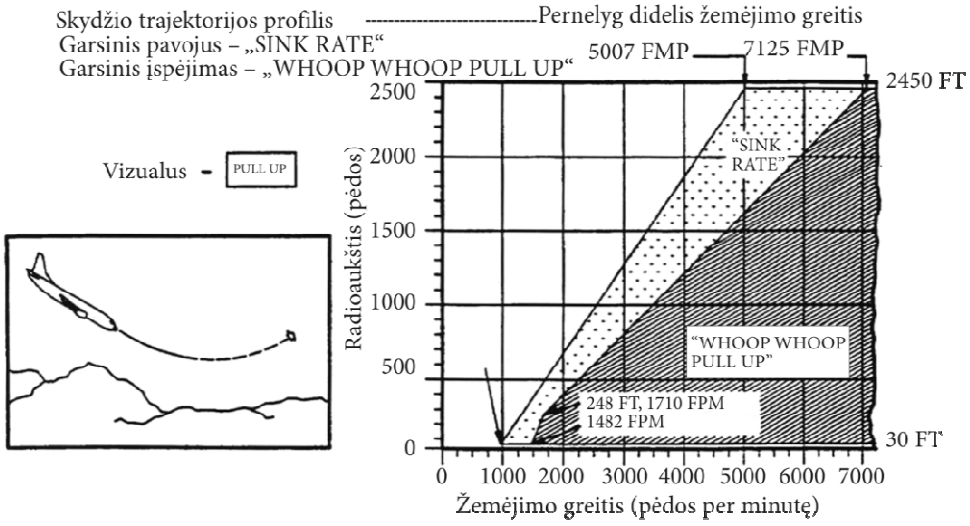
Režimas 1

Didelis žemėjimo greitis, kai orlaivis nuo Žemės paviršiaus yra aukščių H intervale, pavyzdžiui, nuo 800 iki 10 m. Kuo didesnis orlaivio vertikalusis žemėjimo greitis, tuo aukštesnė yra riba, kurioje atsiranda signalizacija. Šis režimas suveikia, kai barometrinis žemėjimas yra per didelis orlaivio tikrojo aukščio Žemės atžvilgiu, ar dėl barometrinio aukščio kitimo signalo gauto iš analoginio-skaitmeninio keitiklio. Režimo 1 suveikimo ribos yra suskirstytos į dvi dalis:

– pradinė žemėjimo greičio zona arba saugos zona *(sink rate area*)**;**

– įspėjimo zona arba pavojaus zona (*pull-up area)*.

Šis režimas yra nepriklausomas nuo važiuoklės ir užsparnių padėties. Režimo 1 perspėjimo zonos viršutinė riba yra 2450 pėdų virš Žemės paviršiaus. Esant tokiam aukščiui, įspėjimas suveikia, kai barometrinis žemėjimas viršija 7125 pėdų/min. Apatinė riba – 50 pėdų virš Žemės paviršiaus ir barometrinis žemėjimas viršija 1500 pėdų/min. Pilni režimo 1 veikimo parametrai pateikiami 2.7.5 pav.

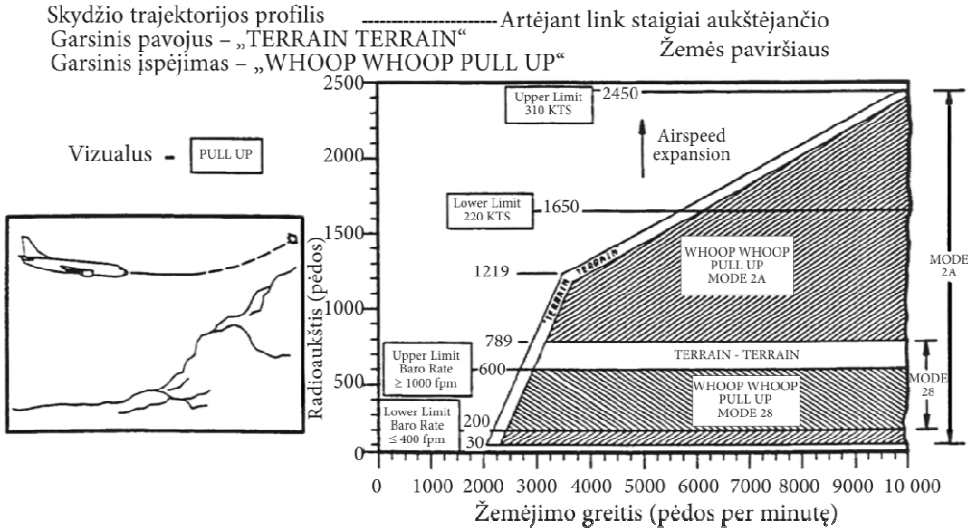


2.7.5 pav. Didelio žemėjimo greičio įspėjimų zonos

Patekus į įspėjimo zoną, užsidega PULL-UP lemputė ir pasigirsta pranešimas „SINK RATE“. Patekus į *Inner warning area* pradeda kartotis įspėjimas „WHOOP WHOOP PULL-UP“.

Režimas 2

Šis režimas aktyvuojasi, kai orlaivis per daug priartėja prie išaukštėjusio Žemės paviršiaus, ši informacija gaunama radio aukščiamačiu. Režimas 2 susideda iš dviejų režimų variantų; režimas 2A, kai užsparniai NĖRA leidimosi padėtyje, režimas 2B kai užsparniai yra leidimosi padėtyje. Pilni režimo 2 veikimo parametrai (2.7.6 pav.):



2.7.6 pav. Įspėjimų sąlygų diagrama, artėjant link staigiai aukštėjančio Žemės paviršiaus

Kaip ir režimas 1, šis režimas veikia dviejose zonose: pradinėje žemėjimo greičio zonoje ir įspėjimo zonoje. Kirtus pirmosios zonos ribas, pasigirsta garsinis signalas „TERRAIN“, kartojamas dukart, paskui eina garsinis signalas „WHOOP WHOOP“ PULL-UP“.

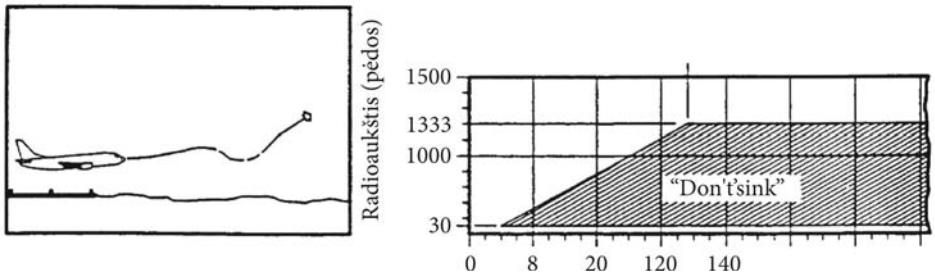
Režimo 2A pavojaus signalas „TERRAIN“ gaunamas, jei važiuoklė ir užsparniai yra ne leidimosi padėtyje. Kai orlaivis išeina iš „PULL-UP“ zonos, perspėjimas tęsiasi tol, kol surenkamas 300 ft barometrinis aukštis arba išleidžiama važiuoklė. Kai greitis padidėja nuo 220 kt iki 310 kt ir važiuoklė įtraukta, režimo 2A įspėjimo ir pavojaus signalai suveikia priklausomai nuo greičio didėjimo funkcijos, viršutinė radioaukčio riba – 2450 ft.

Kai greitis mažesnis nei 220 kt (mazgų), viršutinė riba yra 1650 ft. Režimo 2A įspėjimas aktyvuojasi, kai artėjimas prie Žemės paviršiaus yra lygus arba viršija 600 ft/min. Esant mažesniam aukščiui, įspėjimas suveikia, kai artėjimas prie Žemės paviršiaus viršija 200 ft/min. ir užsparniai NĖRA leidimosi padėtyje.

Režimo 2B įspėjimas aktyvuojasi, kai yra per staigus artėjimas prie Žemės paviršiaus su užsparniais leidimosi padėtyje. Viršutinė suveikimo zonos riba yra 789 ft, kai artėjimas prie Žemės paviršiaus yra lygus arba viršija 3000 ft/min. Apatinė suveikimo riba yra 200 ft ir artėjimas prie Žemės paviršiaus yra lygus arba viršija 2500 ft./min. Zonoje nuo 200 ft iki 600 ft sistemos veikimas priklauso išimtinai nuo barometrinio aukščio kitimo spartos. Norint nutildyti šiame režime garsinį įspėjimą, taip pat reikalingas ir aukščio padidėjimas. Esant artėjimui tūpti su išleistais važiuokle ir užsparniais, aukščio padidejimo funkcija yra užblokuota ir garsinį signalą „TERRAI-TERRAIN“ pakeičia signalas „WHOOP WHOOP“ PULL-UP“.

Režimas 3

Šis režimas aktyvuojasi orlaiviui kylant arba nueinant į antrąjį ratą, kai yra per didelis aukščio praradimas. Pilni režimo 3 veikimo parametrai (2.7.7 pav.):



2.7.7 pav. Įspėjimų sąlygų diagrama, esant žemėjimui po kilimo ar skrydžio ratu

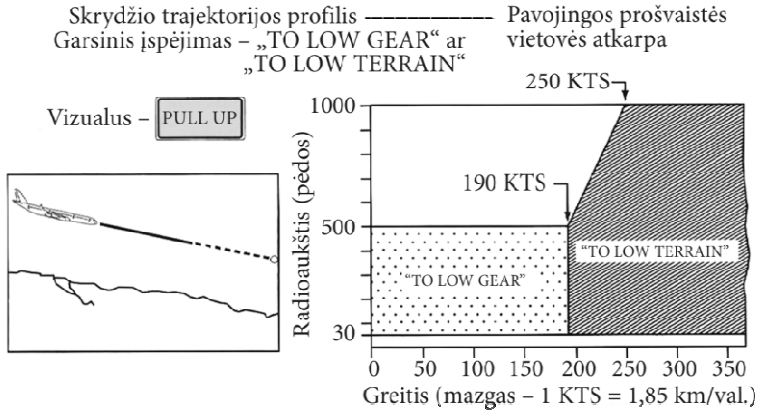
Jei orlaivis patenka į perspėjimo zonos ribas, pasigirsta besikartojantis garsinis signalas „DONT'T SINK" tol, kol pasiekiamas pakankamai spartus aukštėjimas zonoje nuo 30 ft iki 700 ft (tikrasis aukštis). Pavojaus signalas pasikartoja, jei orlaivis, esant kilimui, ima vėl prarasti aukštį. Šis režimas aktyvus tik kylant ir kai įtraukiami užsparniai ir važiuoklė, pereinant į antrąjį ratą. Orlaiviui kirtus 700 ft tikrąjį aukštį su įtraukta važiuokle, režimas 4 paprastai suveikia, kai analoginis-skaitmeninis konverteris nustato 70 ft ar didesnį aukščio praradimą. Esant 1333 ft aukščiui, režimas 3 veikia tik tada, kai greitis viršija 190 ft. Tai daroma tam, kad būtų išvengta pirmalaikio režimo 3 persijungimo į režimą 4, renkant aukštį, kai barometrinio aukščio praradimas pasiekia 128 ft. Režimas 3 taip pat yra neaktyvus, kai užsparniai ir važiuoklė užima leidimosi padėtį.

Didelis aukščio praradimas kylant (smuka), kada or1aivis neparuoštas tūpti (neišleista važiuoklė, užsparniai neišleisti ar pusiau išleisti). Signalizavimo zonų dydis priklauso nuo to, ar smuka matuojama radijo ar barometriniu aukščiamačiu, ar orlaivis kyla ar eina į antrąjį ratą, ir t. t. Ausinėse pilotai girdi įspėjimus „DONT'T SINK" ir „TOO LOW TERRAIN". Orlaivio techniniuose dokumentuose yra visų smukos atvejų grafikai.

Režimas 4

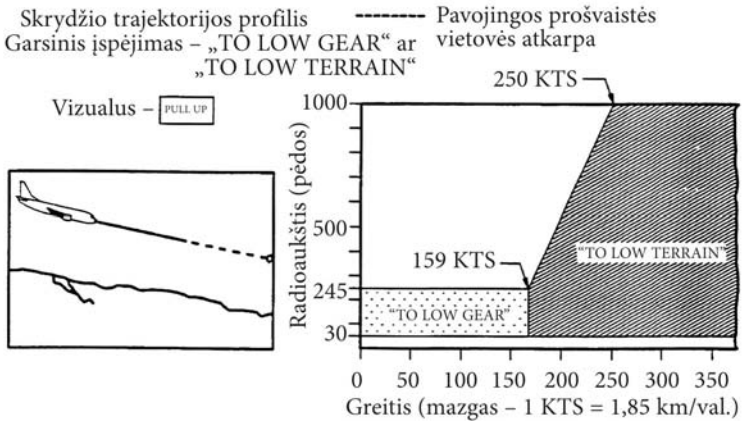
Šis režimas aktyvuojasi, esant bet kokiai pavojingai situacijai dėl orlaivio padėties Žemės paviršiaus atžvilgiu, kai orlaivis nėra leidimosi padėtyje. Taip pat kaip ir režimas 2, šis režimas turi du variantus: režimas 4A – važiuoklė įtraukta, režimas 4B – važiuoklė išleista, užsparniai ne leidimosi padėtyje.

Režimas 4A aktyvuojasi, kai tikrasis aukštis sumažėja iki 500 ft, nepaisant barometrinio aukščio, NEBENT važiuoklė yra pilnai išleista. Standartinė viršutinė riba šiam subrežimui yra 500 ft tikrojo aukščio, kai greičiai mažesni nei 190 kt (mazgų). Esant šiems parametrams, pasigirsta besikartojantis garsinis įspėjimas „TOO LOW GEAR". Kai greitis yra tarp 190 kt ir 250 kt, pasigirsta besikartojantis garsinis įspėjimas „TOO LOW TERRAIN". Viršutinė šio subrežimo veikimo zonos riba yra 100 ft. Pilni parametrai pateikiami 2.7.8 pav. diagramoje.



2.7.8 pav. Įspėjimų sąlygų diagrama, esant pavojingos prošvaistės vietovės atkarpai

Režimas 4B aktyvuojasi, jei užsparniai taip pat yra leidimosi padėtyje. Standartinė viršutinė šio subrėžimo suveikimo riba yra 245 ft (tikrasis aukštis), kai 159 kt greitis. Esant tokiems parametrams, pasigirsta besikartojantis garsinis įspėjimas „TOO LOW FLAPS“. Pilni režimo 4B parametrai 2.7.9 pav.



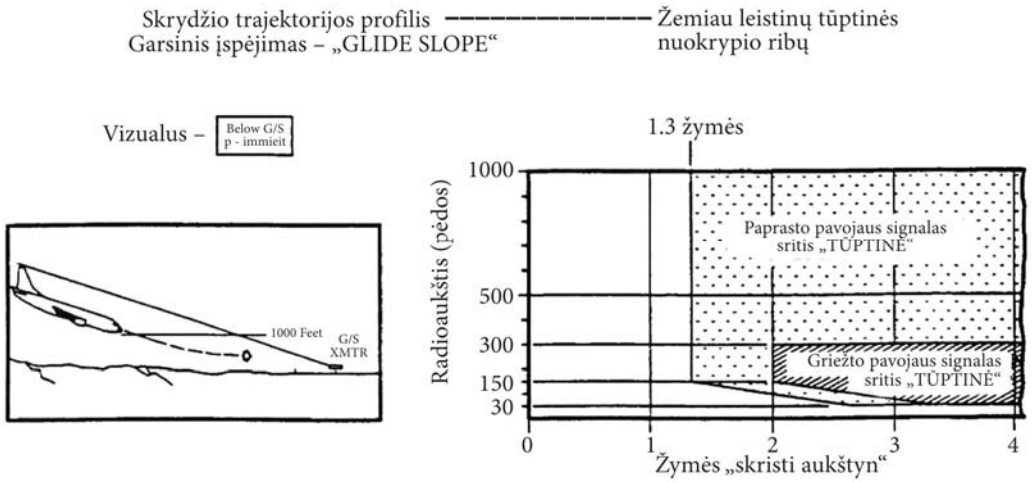
2.7.9 pav. Įspėjimų sąlygų diagrama, esant pavojingos prošvaistės vietovės atkarpai

Esant greičiui tarp 159 kt ir 250 kt, viršutinė suveikimo zonos riba padidėja iki 1000 ft. Besikartojantis garsinis signalas yra „TOO LOW TERRAIN“.

Režimas 5

Šis režimas aktyvuojasi kai orlaivis yra gerokai žemiau virtualiosios ILS tūptinės daugiau kaip 1,3 žymių. Šis režimas turi dvi suveikimo zonas: tylią ir garsią. Nesvarbu kurioje zonoje esant, pasigirsta garsinis signalas „GLIDE SLOPE“. Tuo metu taip pat įsižiebia vizualinai „BELOW G/S“ indikatoriai. Garsinio įspėjimo kartojimo dažnumas tuo labiau didėja, kuo labiau nukrypstama nuo tūptinės ir kuo labiau mažėja aukštis. Pilni režimo 5 parametrai pateikti 2.7.10 pav.

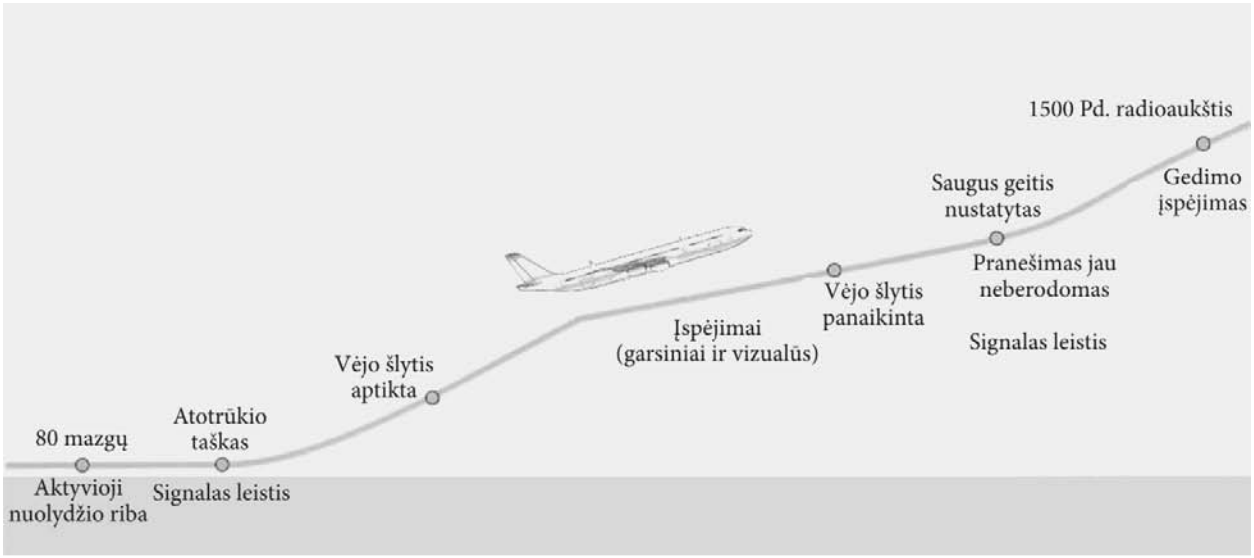
Šis režimas galimas, kai tūptinės detektorius gauna tinkamą signalą ir kai tikrasis aukštis yra lygus arba mažesnis kaip 100 ft. Šio režimo blokavimas, skrendant žemiau kaip 1000 ft, galimas nuspaudžiant BELOW G/S mygtuką. Šis režimas automatiškai deaktyvuojasi, kai aukštis yra didesnis nei 1000 ft. Režimo 5 pavojaus signalai gali būti kartu su režimų 1, 2, 4 signalais, bet, esant režimo 3 signalams, režimas 5 automatiškai užblokuojamas.



2.7.10 pav. Įspėjimų sąlygų diagrama, esant žemiau leistinųjų tūptinės nuokrypų

Režimas 7

Aktyvuojantis šiam režimui, galimi garsiniai bei vaizdiniai signalai, kai aptinkamas vėjo poslinkis kylant ar tupiant. 2.7.11 pav. pateikiama galima įvykių seka, kai kylant susidaro vėjo poslinkis.



2.7.11 pav. Įvykių seka, kai kylant susidaro vėjo poslinkis

Garsinis signalas susideda iš dviejų tonų sirenos, po kurios girdisi garsinis signalas „WINDSHEAR, WINDSHEAR, WINDSHEAR“. Vaizdiniai signalai įsižiebia ant visų elektroninių aukščių indikatorių (EADI), šie įspėjimai kartojasi tol, kol baigiasi vėjo poslinkis. Vėjo poslinkio pranešimai turi pirmenybę prieš visus kitus GPWS signalus.

GPWS veikimo būdai, signalizavimo zonų ribos ir jų grafikai bei kiti konkretūs duomenys apie šias sistemas pateikiami orlaivio techniniuose dokumentuose.

Sistemą galima patikrinti prieš skrydį ir skrendant, bet tik ne tada, kada jis pasiruošęs kilti ar leidžiasi. Nuodugniau sistemą patikrinti ant žemės galima pakėlus orlaivį nuo žemės hidrauliniais keltuvais ir valdant užsparnius bei važiuoklę.

Tikrinimo metu patikrinamos ne tik sistemos schemos, bet ir kitos duomenis tiekiančios orlaivio sistemos. Tikrinant girdimi įspėjimai GLIDE SLOPE – GLIDE SLOPE ir WHOOP WHOOP PULL UP ir šviečia raudona PULL UP lemputė.

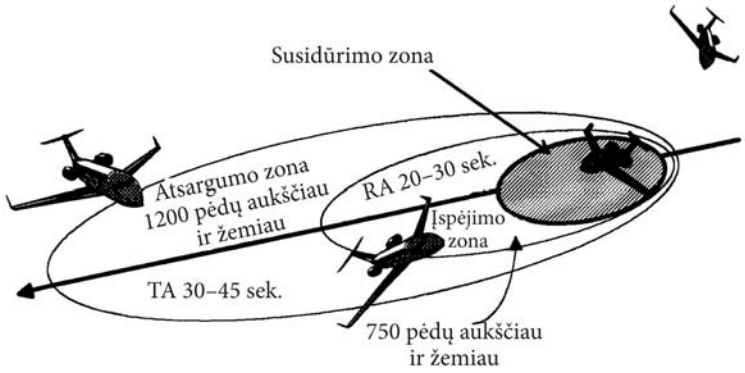
Bendrosios aviacijos reikalavimai:

– Visi orlaiviai su turbininiais varikliais, maksimalia pakilimo mase, viršijančia 15 tūkst. kg, vežantys daugiau nei 30 keleivių, nuo 1979 liepos 1 d. privalo turėti GPWS.
– Visi orlaiviai su turbininiais variklais, maksimalia pakilimo mase, viršijančia 5700 kg, vežantys daugiau nei 9 keleivius, nuo 1999 m. sausio 1 d. privalo turėti GPWS.
– GPWS turi veikti automatiškai, susidarius galimai pavojingai situacijai. nedelsiant pateikti būdingus įspėjamuosius signalus.
– Minimalus GPWS perspėjimų signalų turinys nuo 1999 m. sausio 1 d.:
  - per staigus žemėjimas;
  - nepriimtinas artėjimas prie Žemės paviršiaus;
  - per didelis aukščio praradimas kylant ar nueinant į antrąjį ratą;
  - nesaugus priartėjimas prie Žemės paviršiaus leidžiantis;
  - netinkama važiuoklės ir užsparnių padėtis;
  - per didelis nukrypimas nuo ILS tūptinės.
– Naujesnės Žemės artumo įspėjimo sistemos turi tarptautinį pavadinimą TAWS *(Terrain awareness and warning system).* JAV jos vadinamos EGPWS *(Enhanced GPWS).* TAWS gali laiku įspėti pilotus apie orlaivio priekyje esančias kliūtis. Jų kompiuteryje yra vietovės, virš kurios skrendama, reljefo ir kliūčių vietų bei jų aukščių duomenys. Kompiuteris iš oro duomenų kompiuterio gauna skrydžio

aukščio ir greičio duomenis, o iš navigacijos priemonių – faktinės orlaivio vietos geografines koordinates. Atsižvelgiant į skrydžio aukštį, greitį ir Žemės paviršiaus nelygumus bei kliūtis, informacija rodoma meteorologinio lokatoriaus, EFIS ar kituose elektroniniuose vaizduokliuose skirtingomis spalvomis, atsižvelgiant į pavojingumą. Galima pasirinkti mastelį. Pilotams lieka iki 30 min. laiko pakeisti skrydžio trajektorijai.

2.7.4. Susidūrimų išvengimo sistema

Įvadas. Vis didėjant orlaivių skaičiui, ypač oro uostų prieigose, susidūrimo ore rizika dramatiškai išaugo ir, siekiant išvengti galimų nelaimių, šiuolaikinai orlaiviai aprūpinami specialia įranga, orlaivių susidūrimų išvengimo sistemomis TCAS (*Traffic Alert and Collision Avoidance System*). TCAS tikslas ir funkcijos yra perspėti skrydžio įgulą apie jų erdvėje esančius orlaivius ir, kilus susidūrimo pavojui, jei įmanoma, pasiūlyti išvengimo manevrą. Tai pasiekiama vien orlaivyje esančios įrangos dėka ir be jokių nurodymų, gautų iš antžeminės įrangos, kurią naudoja skrydžių vadovai. Sistemos paskirtis – papildyti, o ne keisti orlaivių srautų ore valdymo metodus. Sistema stebi netoli skrendančius kitus orlaivius, įspėja pilotus apie galimą susidūrimą su jais ir duoda pilotams suderintus su kitais orlaiviais nurodymus, kaip valdyti orlaivį, siekiant išvengti susidūrimo. Sistema sukuria aplink orlaivį įspėjamąją zoną TA (*Traffic advisory),* į kurią patekus kitam orlaiviui, apie jo atsiradimą pranešama pilotams. Įspėjamosios zonos spindulys yra ne mažesnis kaip 45 km. Įspėjamoji ir jos viduje esanti pavojingoji zonos panašios į cilindrą, zonų dydis priklauso nuo orlaivių judėjimo krypčių bei greičių ir nuo to, ar vienodame aukštyje jie skrenda (2.7.12 pav.).



2.7.12 pav. TCAS veikimo zonos

TCAS skirstomas į keletą lygių:

TCAS I

Šis sistemos lygis suteikia tik *Eismo Patarimą* (TA – *Traffic Advisory*) (t. y. įspėjimą, kuriuo skrydžio įgulai pranešama apie potencialų eismo pavojų, stimuliuojantį vizualiai surasti arti esantį kitą orlaivį ir išvengti susidūrimo su juo). TA vaizduoklis rodo potencialiai pavojingo orlaivio atstumą ir kryptį. Ši TCAS I funkcija veikia tik kaip įspėjantis signalas ir galimybė vizualaus kontakto dėka išvengti susidūrimo, nenurodant paties išvengimo manevro. TCAS I veikimo nuotolis yra keli kilometrai, apie kitus or1aivius ji praneša tik jiems esant visai netoli, kito or1aivio krypties nustatymas yra maždaug 14 laipsnių.

TCAS II

Šis sistemos lygis turi tokias pačias galimybes kaip ir TCAS I, ji įspėja pilotus apie TA zonoje esančius orlaivius, be to, papildomai gali būti pateikiamas susidūrimo išvengimo manevras vertikalioje plokštumoje, kuris vadinamas *sprendimo patarimu* (RA – *Resolution Advisory*). Patekus kitam orlaiviui į pavojingąją zoną RA, nurodo pilotams, kaip keisti (ar nekeisti) aukštį, kad išvengtų susidūrimo, prognozuojant savojo ir kito or1aivio judėjimą. Kito or1aivio krypties nustatymas yra maždaug 9 laipsniai, pavojingosios zonos spindulys – ne mažesnis kaip 25 km.

TCAS III

Ši sistema turi tokias pačias galimybes kaip ir TCAS II, tačiau pateikia RA ir manevravimo nuorodas vertikalioje ir horizontalioje plokštumose. Patekus orlaiviams į pavojingąją zoną RA, nurodo jiems, kaip reikia keisti (ar nekeisti) skrydžio aukštį ir kryptį, kad išvengtų susidūrimo, prognozuojant savojo ir kito or1aivio judėjimą. Kito orlaivio krypties nustatymas yra maždaug 2 laipsniai.

Naudojant duomenų sistemą 1090ES *(Mode – S data link),* TCAS III gali siųsti ir priimti orlaivio koordinačių, greičio vektoriaus ir kitus duomenis. Tai padidina jos veikimo tikslumą.

Orlaivio TCAS II ar III sistemos maždaug vieną kartą per sekundę siunčia kitam orlaiviui klausiamuosius signalus. Jei kito orlaivio atsakiklis veikia C būdu, jis duoda atsakomąjį signalą, kuriame yra duomenų apie to orlaivio aukštį. Pagal šiuos duomenis galima nustatyti, kaip greitai jis kyla ar žemėja. Matuojant laiką nuo paklausimo iki atsakymo iš kito orlaivio, galima nustatyti atstumą iki to orlaivio. Kryptis į kitą orlaivį nustatoma naudojant kryptinę anteną.

Nustatydama susidūrimo pavojingumą, sistema vykdo dvi pagrindines operacijas: analizuoja skrydžio laiką iki orlaivių mažiausio tarpusavio suartėjimo vietos ir orlaivių aukščius. Sistema pirmenybę teikia ne atstumui tarp orlaivių, bet laikui iki pavojingiausios suartėjimo vietos.

Trumpai TCAS veikimą galima apibūdinti taip:

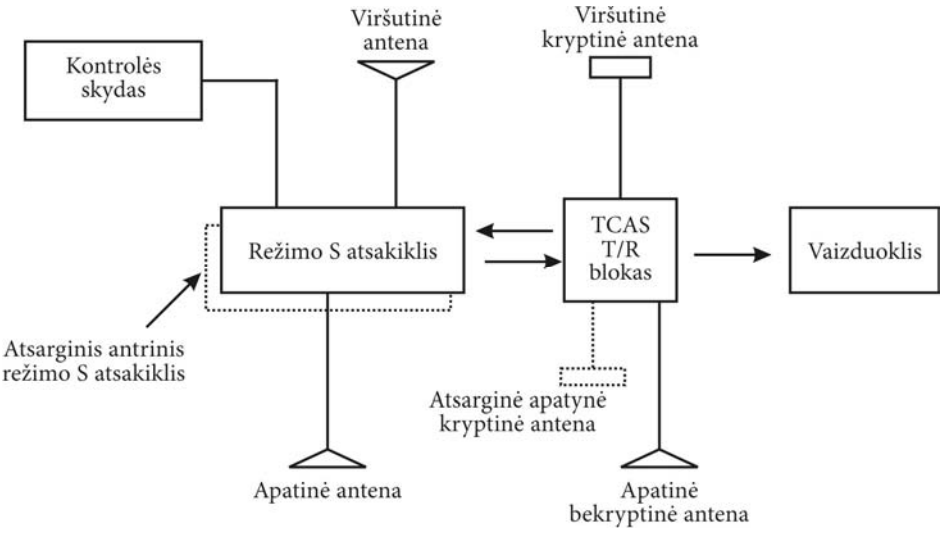
– kito orlaivio, esančio įspėjamojoje zonoje, sekimas;
– orlaivių suartėjimo pavojingumo nustatymas;
– pilotų įspėjimas, kad galimas pavojingas suartėjimas;
– susidūrimo pavojingumo nustatymas pagal orlaivių greičius, aukščius ir jų kitimo greičius bei skrydžio kryptis vienas kito atžvilgiu;
– nurodomai pilotams, kaip išvengti susidūrimo.

TCAS II yra plačiausiai naudojama sistema, suteikianti būtinus vertikalaus manevravimo patarimus. Pagal *Joint Airworthiness Requirements*, nuo 2000 m visi komerciniai orlaiviai per 15 tūkst. kg ir 30 ar daugiau sėdimų vietų, skraidydami Europos oro erdvėje, privalo turėti TCAS II. Ši sistema suteikia:

– TA generavimas;
– pavojų aptikimas;
– RA generavimas;
– koordinacija;
– sekimas ir priežiūra;
– ryšys su antžemine stotimi.

Pirmi keturi iš šių punktų veikia per kiekvieną pilną operacijų ciklą ir tai užima apytiksliai 1,2 s visoms užduotims užbaigti.

Įmontavimas į orlaivį. Apačioje (2.7.13 pav.) parodyta, kokia įranga yra reikalinga palaikyti TCAS II.



2.7.13 pav. TCAS II palaikymo įrangos struktūrinė schema

Į viršuje esančią įrangą įeina:
– TCAS kompiuteris (siųstuvas ar imtuvas);
– dvi TCAS antenos: viršutinė kryptinė antena ir apatinė, kuri gali būti kryptinė arba nekryptinė;
– kombinuotasis TC atsakiklis ar TCAS kontrolės pultas;
– pilotų kabinos ekranas;
– Mode S atsakiklis su viršutine ir apatine nekryptine antena.

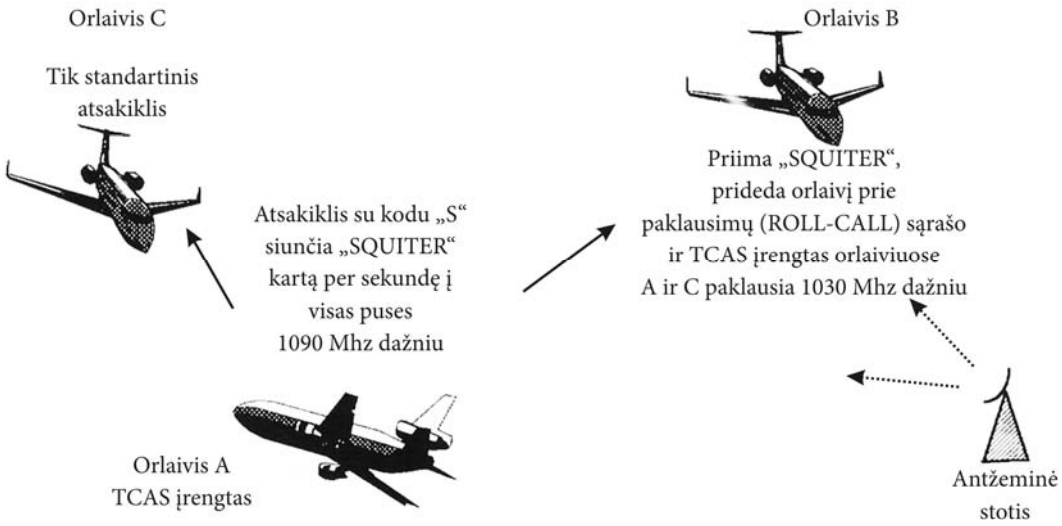
TCAS II priima impulsus iš:
– aukščiamačio ir (arba) oro duomenų kompiuterio ADC (*Air Data Computer*) su slėginio aukščio pataisomis;
– radijo aukščiamačio (*Radio Altimeter*), kad galėtų nustatyti daugelį operacinių apribojimų;
– užsparnių ir važiuoklės grandinės, kurios suteikia orlaiviui konfigūracijos statusą;
– FMC, suteikiantis operatyvius duomenis, tokius kaip aukščio „lubos“.

Pastaba. TCAS nėra prijungtas prie autopiloto ar FMS (tai įtraukia INS/IRS) ir todėl išlieka nepriklausomas nuo jų ir dėl to nenustoja funkcionavęs sugedus bet kuriai iš šitų sistemų. TCAS pasikliauna kitų orlaivių atsakikliais, kad nustatytų jų buvimo vietą, taigi orlaiviai, neturintys šios sistemos, bus lyg permatomi. Jei objektas atsakys tik su Mode A, prietaisas pamanys, kad orlaiviai yra viename skrydžio lygyje kaip užklausėjas ir veiks tik TA. TCAS saugus oro greitis yra apibrėžiamas horizontaliai pagal laiką iki suartėjimo zonos ir pagal ATC vertikalaus išsiskyrimo minimumą 400–700 ft priklausomai nuo aukščio.

TA pranešimas atsiranda kai lieka 30–45 s iki suartėjimo su pavojinga zona, o RA atsiranda, kai lieka 20–30 s iki susidūrimo zonos.

Orlaivio TCAS II ar III sistemos maždaug vieną kartą per sekundę siunčia kitam orlaiviui klausiamuosius signalus. Jei kito orlaivio atsakiklis veikia C būdu, jis siunčia atsakomąjį signalą, kuriame yra duomenų apie to orlaivio aukštį. Pagal šiuos duomenis galima nustatyti, kaip greitai jis kyla ar žemėja. Matuojant laiką nuo paklausimo iki atsakymo iš kito orlaivio, galima nustatyti atstumą iki to orlaivio. Kryptis į kitą orlaivį nustatoma naudojant kryptinę anteną.

TCAS II veikimas. 2.7.14 pav. parodyta, kaip veikia TCAS II sistema.



2.7.14 pav. Orlaivių ryšiai, veikiant TCAS II

– Orlaivyje A yra įrengtas TCAS ir naudoja atsakiklį su kodu S savo unikaliam atpažinimo kodui siųsti kartą per sekundę, transliuojant visomis kryptimis, tai vadinamoji „*Squitter*“.
– Kiti orlaiviuose sumontuoti TCAS skenuoja teritoriją 1090 MHz dažniu. Kai atpažįstamas tikrasis „*Squitter*“ signalas, sistema prideda kodo siuntėją prie sarašo arba perklausimo (*List or Roll Call*) dėl papildomos informacijos.
– Orlaivis A taip pat atlieka perklausimus (*RollCall*) gavęs „*Squitter*“ iš kitų orlaivių, kuriuose įrengtas TCAS.

– TCAS II siųstuvai, esantys orlaiviuose A ir B, papildomai siunčia užklausimo signalus, kad nustatytų kitus orlaivius, kuriuose įrengtas tik standartinis atsakiklis. Taigi, TCAS siųstuvas siunčia bendrą užklausimo signalą visiems standartiniams atsakikliams. Kad atskirtų skirtingų orlaivių, esančių netoliese atsakymus, atsakiklis turi šias funkcijas:
  - antenos konstrukcija leidžia individualiai siųsti iš eilės į kiekvieną ketvirtį užklausimo signalą.
  - užklausimo signalą sudaro keletas impulsų, kurie pradžioje siunčiami mažos galios, paskui po truputį didinama jų galia. Tai vadinama „šnabždesys / šaukimas“ (*Whisper / Shout*), dėl šios funkcijos arčiau esantieji orlaiviai atsako anksčiau nei toliau esantieji. Todėl TCAS gali sekti atskirus atsakymus, taip pat apriboti nereikalingą energijos perteklių.
– Orlaivis C atsako į tokius užklausimus, bet įranga su kodu „S“ orlaivyje B atsako tik į kodo „S“ užklausimus.
– Gavęs visus perklausimus (*Roll Call*) orlaivis A atskirai užklaus kiekvieno saraše (*List*) esančio orlaivio. Kai TCAS antena gauna atsakymus, tai leidžia nustatyti įsibrovėlius. Jei įsibrovėlis gali atsakydamas pateikti savo aukštį, tai TCAS taip pat pasinaudoja šia informacija. Nuotolis nuo įsibrovėlio nustatomas pagal laiko intervalą tarp užklausos ir atsakymo signalų.
– Aukštis, aukščio kitimas, nuotolis ir nuotolio kitimas taip pat nustatomi sekant atsakymus iš kiekvieno užklausto orlaivio. Pagal kompiuterio atliktą atsakymų analizę TCAS nustato, kuris orlaivis gali kelti susidūrimo grėsmę, ir teikia patarimus orlaivio įgulai, kitas orlaivis kerta 1200 ft atstumą. Kai yra keletas pavojų, tai kiekvienam pavojaus atvejui teikiami optimalūs patarimai, kaip jo išvengti.
– Kai gaunamas ir apdorojamas signalas su kodu „S“ bei nustatoma susidūrimo galimybė, kompiuteris formuoja kodo „S“ duomenų perdavimo liniją oras-oras (*air-to-air*) su kitame orlaivyje esančiu TCAS II kompiuteriu. Kompiuteriams susitarus dėl tolesnių veiksmų, prireikus duodami patarimai.

TCAS garsiniai įspėjimai. Jeigu kompiuteris nustato susidūrimo tikimybę, tai įjungiamas garsinis signalas „TRAFFIC, TRAFFIC“. Jei vėliau bus reikalingi vengiamieji veiksmai, tai *Resolution Advisory* (RA) atsižvelgia į *Traffic Advisory* (TA) ir garsiniu būdu praneša, kokie būtini vengimo veiksmai (pavyzdžiui, CLIMB, CLIMB).

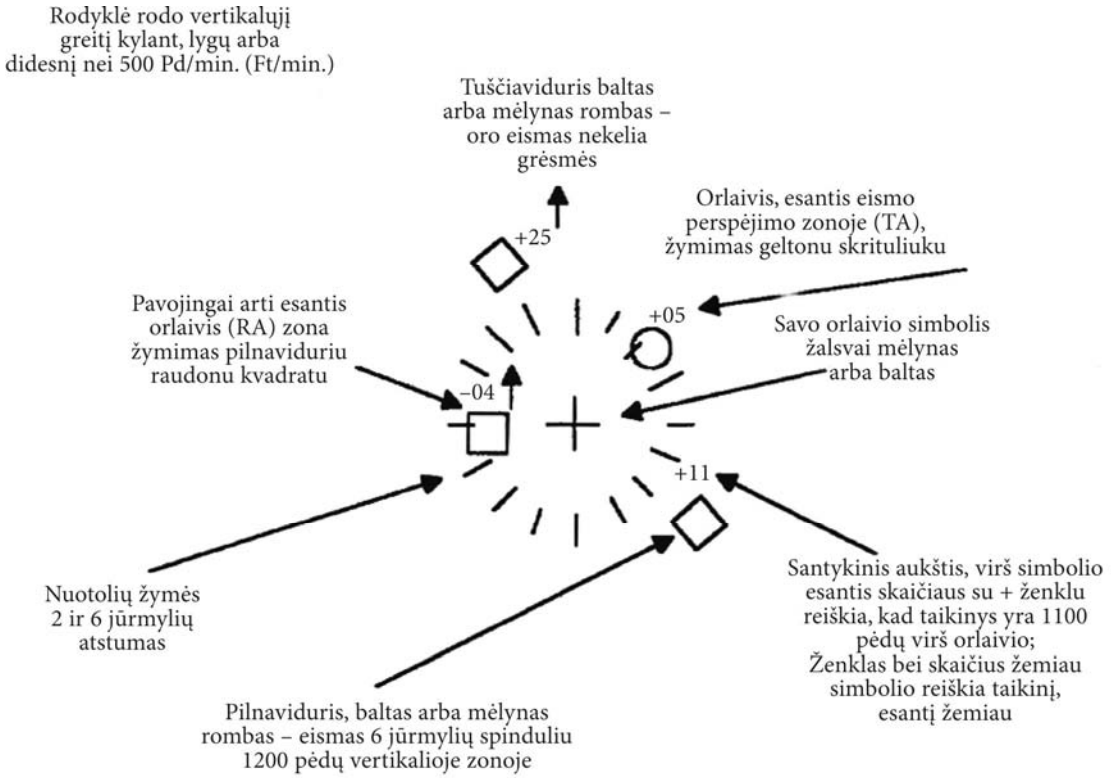
RA gali būti: ***korekcinis*** – tai nurodo skrydžio įgulai „CLIMB“ arba „DISCEND“ arba „DON'T CLIMB/DISCEND“.

Prevencinis. Jie pataria skrydžio įgulai, kad būtų išvengta klaidingų veiksmų ir orlaivių maršrutai nesusidurtų. Galimi žodiniai patarimai pateikti 2.7.2 lentelėje.

2.7.2 lentelė. Žodiniai veiksmų patarimai

1	Climb, Climb, Climb
2	Descend, Descend, Descend
3	Reduce Descend, Reduce Descend
4	Reduce Climb, Reduce Climb
5	Monitor Vertical Speed, Monitor vertical speed
6	Clear of Conflict
7	Climb, Crossing Climb,Climb, Crossing Climb
8	Descend, Crossing Descend, Descend, Crossing Descend
9	Increase Climb, Increase Climb
10	Increase Descend, Increase Descend
11	Climb-Climb Now, Climb-Climb Now
12	Descend-Descend Now, Descend-Descend Now

Informacinis ekranas. Būtinas susidūrimo išvengimo manevras vertikalioje plokštumoje, esant kitam orlaiviui pavojingoje zonoje RA, vadinamas *sprendimo patarimas* (RA – *Resolution Advisory*). Pateikiamas specializuotame RA/VSI (sprendimo patarimų / vertikaliojo greičio indikatoriaus) spalvotame skystųjų kristalų ekrane, kuriame rodoma aukštėjimo sparta bei informacija apie pavojingu atstumu esantį orlaivį (2.7.15 pav.). Kai kuriuose orlaiviuose informacija gali būti pateikiama navigaciniame EFIS ekrane.



2.7.15 pav. Vengimo nurodymų ir vertikaliojo greičio indikatorius (RA/VSI)

Abiem atvejais simbolika lieka tokia pati:

– tuščiaviduris baltas arba mėlynas rombas – oro eismas nekelia grėsmės;
– pilnaviduris baltas arba mėlynas rombas – eismas 6 jūrmylių spinduliu 1200 pėdų vertikaliojoje zonoje;
– pilnaviduris geltonas skritulys – eismo įspėjimas (*Eismo Patarimas*, A – *Traffic Advisory*), t. y. įspėjimas, kuriuo skrydžio įgulai pranešama apie potencialų eismo pavojų;
– pilnaviduris raudonas kvadratas – susidūrimo išvengimo manevras (*sprendimo patarimas,* RA – *Resolution Advisory*).

Kiekvienas simbolis turi jam priskirtus duomenis, vaizduojamus ta pačia spalva. Rodyklė prie simbolio rodo esantį vertikalųjį greitį, ne mažesnį nei 500 ft/min.

Ši informacija parodo santykinį stebimo orlaivio aukštį savo orlaivio atžvilgiu, pavyzdžiui, +06 reiškia, kad orlaivis yra 600 pėdų virš mūsų orlaivio. Rodyklės kryptis parodo, ar stebimas orlaivis aukštėja, ar žemėja. Dažnai yra galimybė parodyti absoliutųjį aukštį šimtais pėdų.

Jei aptiktasis pavojingas orlaivis nesiunčia aukščio duomenų (atsakiklis su kodu A), informacija prie simbolio nerodoma, o jei atsakiklis sugedęs, TCAS jo aptikti negali.

Maksimalus TCAS veikimo nuotolis yra 14 jūrmylių, tačiau didelio eismo oro erdvėse nuotolis gali sumažėti iki 5 jūrmylių.

Susidūrimo išvengimo nurodymai (RA) aktyvuojami laiko intervale nuo 15 iki 35 s prieš pavojingo orlaivio priartėjimą minimaliu atstumu, o eismo įspėjimai (TA) – nuo 5 iki 20 s anksčiau negu RA.

TCAS įranga geba stebėti iki 30 orlaivių, tačiau realus pajėgumas yra apie 27 dideliu greičiu artėjantys orlaiviai 14 jūrmylių spinduliu.

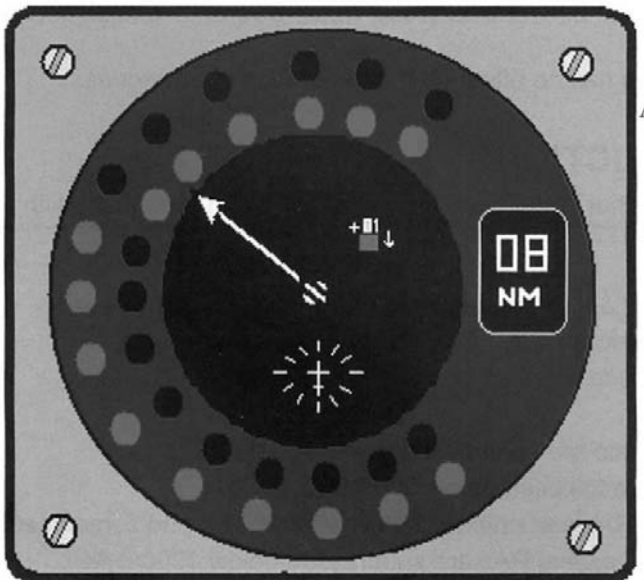
Reikalingų susidūrimų vengimo veiksmų nurodymai paprastai pateikami per specialųjį vertikaliojo greičio indikatorių (2.7.16 pav.).

TCAS VGI (vertikaliojo greičio indikatorius) turi spalvotą skystųjų kristalų ekraną, kuriame atvaizduojami aukštėjimo greičiai ir pavojų keliančio orlaivio informacija, rodoma simboliais centre. Du žemesnieji mygtukai keičia rodomos zonos nuotolį tarp 4, 8 ir 16 jūrmylių. Savojo orlaivio simbolis rodomas 2/3 ekrano nuo viršaus. Artimesnis nuotolio žiedas nuolat rodo 2-jų jūrmylių atstumą, o nustačius 16 jūrmylių matomą zoną, isijungia antrasis žiedas, žymintis 6 jūrmylių atstumą.

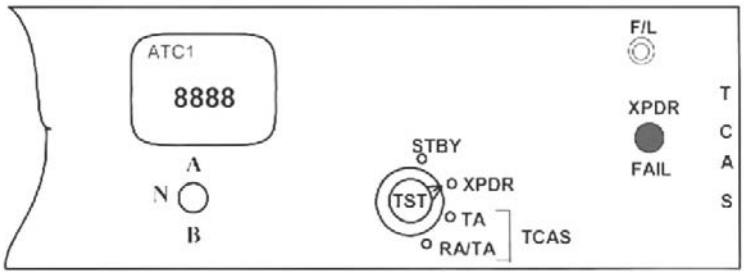
Nurodymai pateikiami rodant dalį VGI skalės raudonai, o reikalingą aukštėjimo ar žemėjimo greitį – žaliai, nurodant reikalingą spartą.

Prietaisų ryškumo reguliatorius kontroliuoja ekrano šviesumą, o automatiniai davikliai reguliuoja ekraną pagal skirtingas pilotų kabinos apšvietimo sąlygas.

TSAS valdymo skydas. TCAS valdomas atsakiklio su kodu S kontrolės skydu (2.7.17 pav.).



2.7.16 pav. TCAS informacija elektroniniame vaizduoklyje



2.7.17 pav. TCAS kontrolės skydas

Jungiklis A/N/B nurodo aukščio, kuriame stebimi orlaiviai diapazoną:

A (bove) nuo 2700 ft žemiau iki 7000 ft virš orlaivio;

N nuo 2700 ft žemiau iki 2700 ft virš orlaivio;

B (elow) nuo 7000 ft žemiau iki 2700 ft virš orlaivio.

Pastaba. Šis jungiklis nevaldo nurodymų aktyvavimo.

Naudojimo apribojimai. TCAS gali būti iš dalies arba visiškai išjungtas, siekiant išvengti konfliktų su kitokių veiksmų reikalavimais:

– esant veikiančioms GPWS arba vėjo poslinkio sistemoms, joms teikiama pirmenybė;

– žemiau nurodytų aukščių:

- žemiau 400 ft AGL TCAS signalai nuslopinami;
- visi nurodymai stabdomi žemiau nei 500 ft AGL;
- žemėjimo nurodymai blokuojami žemiau nei 1000 ft (kartais 700 ft) AGL;
- skubaus žemėjimo nurodymai slopinami žemiau nei 1800 ft AGL.

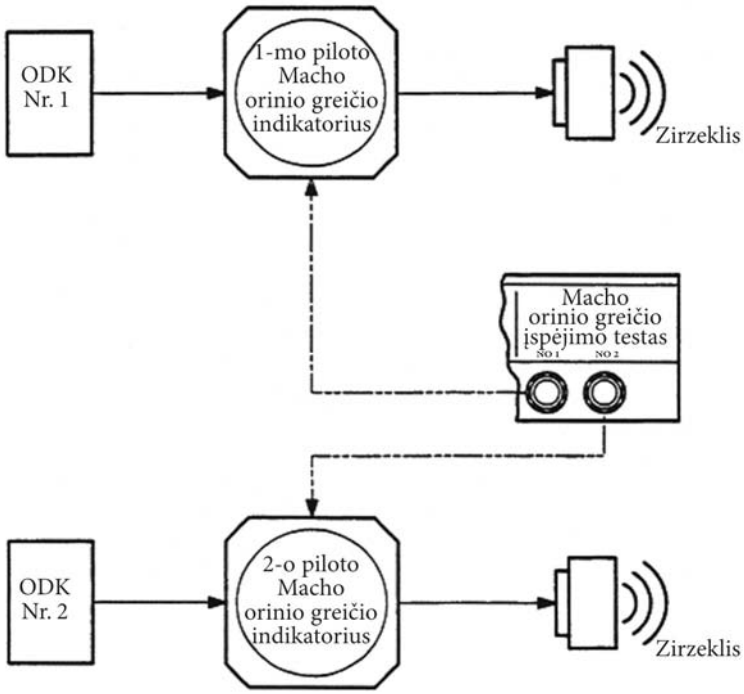
– aukštėjimo ir (arba) skubaus aukštėjimo nurodymai gali būti stabdomi tais atvejais, kai manevras negali būti saugiai atliktas dėl orlaivio evoliucijų limitų;
– orlaivio įgula turi galimybę naudodamasi valdymo skydu įjungti tik perspėjimus dėl eismo, siekdama išvengti nereikalingų nurodymų, pavyzdžiui, atskirais atvejais – paraleliam užėjimui tūpti.

2.7.5. Greičio viršijimo įspėjimai

Orlaivio greitį riboja jo konstrukcija. Orlaivio sparnus ar uodegos plokštumas aptekančių oro srautų greitis gali pasiekti garso greitį, kada orlaivio greitis daug mažesnis už garso greitį. Tada oro srautai pradeda atitrūkti nuo valdymo plokštumų ir staigiai keičiasi jų efektyvumas. *Boeing* tipo orlaiviuose tai įvyksta, kai jie pasiekia 0,62 M greitį, panašiai yra ir kituose orlaiviuose. Tokia Macho greičio reikšmė vadinama kritine. Greičio matuokliai su skale, rodančia greitį Macho vienetais, parodo pilotui šio reiškinio atsiradimo momentą. Tai padeda išvengti kritinių lėktuvo ir variklių valdymo režimų.

Macho orinio greičio įspėjamoji sistema sukelia skirtingus garsinius perspėjimus, kada viršijamos maksimaliai leistinos greičių V_{MO} arba M_{MO} ribos. Šie oriniai greičiai priklauso nuo struktūrinių apribojimų prie žemo aukščio ir orlaivio valdymo charakteristikų dideliuose aukščiuose. Į sistema įeina du nepriklausomi Macho orinio greičio vaizdavimo kanalai, paprastai valdomi iš centrinio oro duomenų kompiuterio (CADC) per vidinį mechanizmą, sudarytą susiejant tarpusavyje aukščio ir orinio greičio membranines dėžutes. 2.7.18 pav. pateikta tipinė tokios sistemos schema.

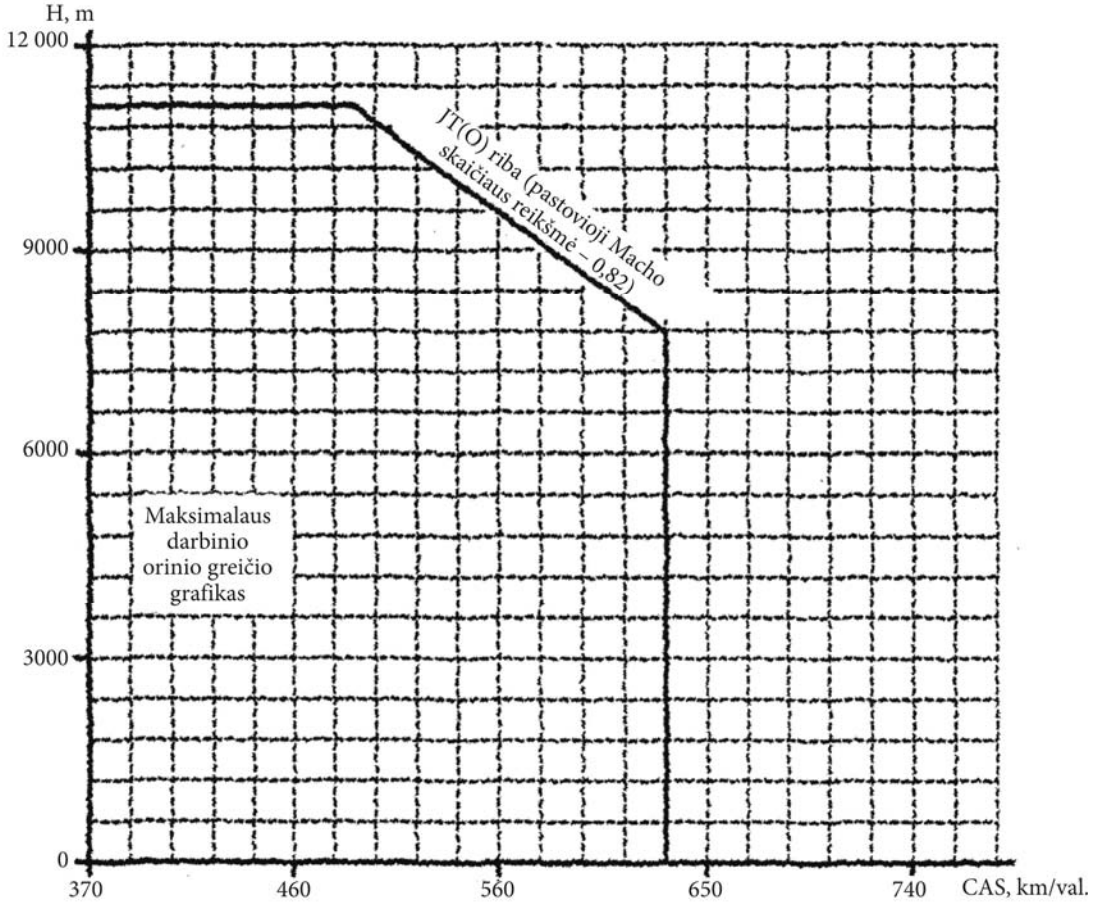
Įspėjamoji sistema gauna faktinius greičio ir aukščio signalus iš oro duomenų kompiuterio, o pasirinktojo greičio signalą – iš orlaivio skrydžio valdymo sistemos kompiuterio. Šiuos signalus sistemos elektroninis blokas apdoroja ir rodo Macho skaičių garsu įspėdama pilotus, kada orlaivio greitis artėja prie didžiausios galimos reikšmės.



2.7.18 pav. Macho orinio greičio viršijimo įspėjamosios sistemos struktūra

Kad pilotas galėtų laiku reaguoti ir neleisti orlaiviui viršyti šios reikšmės, elektroninis blokas įspėjimo momentą skaičiuoja įvertindamas orlaivio greičio pasikeitimus, skrydžio aukštį ir kitus duomenis, taip pat ir orlaivio tipą.

Boeing 737-500 tipo orlaivių didžiausio leistinojo greičio grafikas parodytas 2.7.19 pav.



2.7.19 pav. Leistinojo greičio grafikas

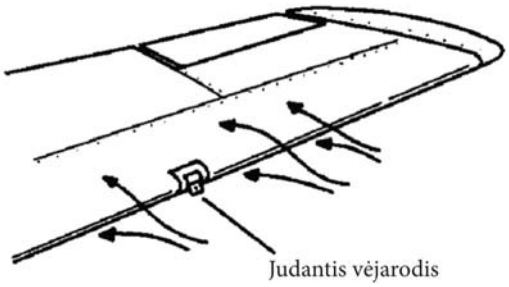
Skrendant žemiau nei 7915 m, CAS negali viršyti 630 km/val. Skrendant aukščiau, greitis negali viršyti 0,82 M. Kai M = const, leistinasis greitis, didėjant aukščiui, mažėja. Aukščiau nei 11300 m orlaivis skraidyti negali.

Machometrai siunčia greičio viršijimo signalą įspėjimo sistemai, kai greitis viršija leistąją reikšmę. Įspėjimo signalas girdimas kabinos zirzekliuose Tai traškantis garsas, kurio negalima supainioti su kitais kabinos garsais.

2.7.6. Greičio praradimo įspėjimo sistema

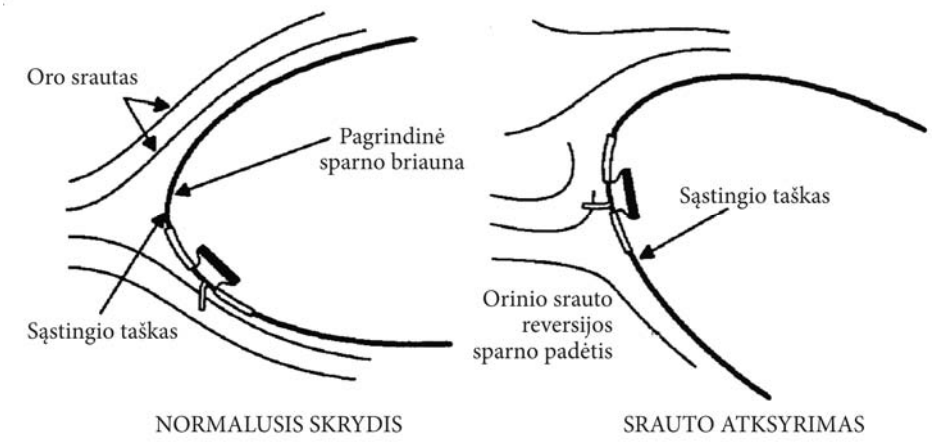
Orlaiviui artėjant prie orinio greičio praradimo būsenos, atsirandančios dėl sparną aptekančio oro srauto atskyrimo, kurį sukelia pavojingi sparno atakos kampo pokyčiai, įspėjimo įtaisai, formuojantys įspėjamuosius nurodymus pilotams, priklauso nuo orlaivio tipo. Pavyzdžiui, lengvuose ir transporto orlaiviuose greičio praradimo įspėjimo įrenginiai skiriasi. Panagrinėsime juos atskirai.

Lengvųjų orlaivių greičio praradimo įspėjimo įtaisai. Lengvuose orlaiviuose orinio greičio praradimo įtaisai aktyvuojami pirminiais atakos kampo davikliais, įtaisytais sparno konstrukcijoje. Tokie davikliai turi judančio vėjarodžio pavidalą, montuojami apytikriai sparno viduryje ir nukreipiami ta pačia kryptimi kaip ir sparnas, šiek tiek žemiau jo priekinio krašto (2.7.20 pav.).



2.7.20 pav. Lengvojo orlaivio greičio praradimo daviklis

Orlaiviui judant į priekį normaliu sparno atakos kampu, aptekantis sparną oro srautas yra laminarinis ir simetriškai pasiskirsto sparno briaunos atžvilgiu (2.7.21 pav., normalusis skrydis). Šiuo atveju, slėgiui pasiskirstant aplink sparną, statinio slėgio „sąstingio taško" padėtis yra aukščiau vėjarodžio ir yra neaktyvioje padėtyje.



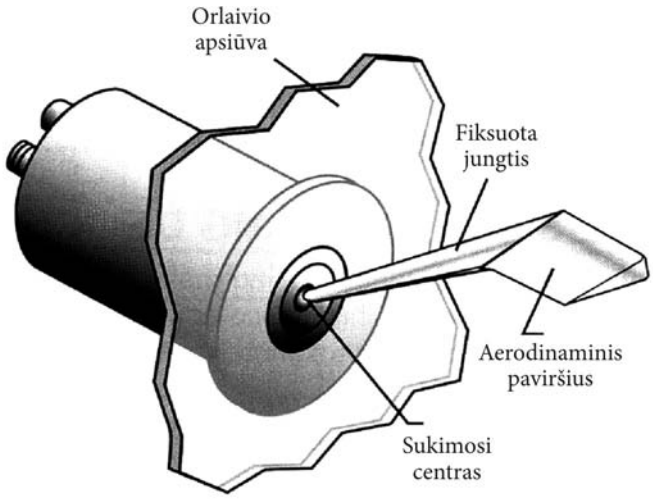
2.7.21 pav. Greičio praradimo įspėjimo aktyvavimas

Kada, didinant atakos kampą, pasiekiamas orinio greičio „praradimo kampas", aptekantis sparną oro srautas tampa turbulentinis, dalies srauto reversinis judėjimas nukrypsta į viršų, o sąstingio taškas pasislenka žemiau vėjarodžio (2.7.21 pav., srauto atskyrimas). Vėjarodis keičia savo padėtį ir aktyvuoja greičio praradimo įspėjimo įtaisą.

Orinio greičio praradimo įspėjimo įtaiso elektrinė schema suveikia ir įjungiamas įspėjimo garsiakalbis. Įspėjimas įprastai atliekamas nenutrūkstamu garsu ir nutraukiamas, kada sumažėja atakos kampas (t. y. kada orlaivio orinis greitis padidėja).

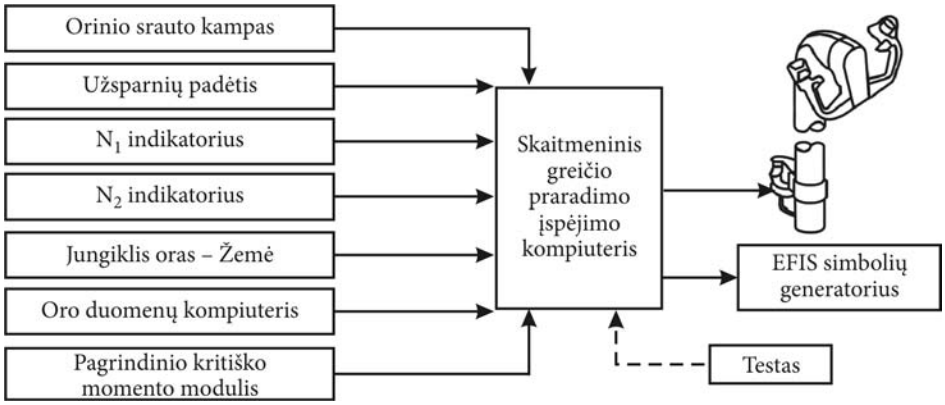
Transporto orlaivių greičio praradimo įspėjimo įtaisai. Daugumoje šiuolaikinių transporto orlaivių orinio greičio praradimo įspėjimo įtaisai aktyvuojami ***atakos kampo*** arba ***Alfa*** davikliais. Vienas iš tokių daviklių parodytas 2.7.22 pav.

Daviklis tvirtinamas vienoje arba kitoje orlaivio sklandmens pusėje, netoli orlaivio nosies, ir reaguoja keisdamas padėtį priklausomai nuo orlaivio atakos kampo kitimo, kintant oriniam greičiui. Daviklis turi tam tikrą aerodinaminio sparnelio paviršiaus pavidalo formą, keičiančio savo padėtį priklausomai nuo aptekančio orinio srauto krypties. Kada daviklio fiksuojančios jungties padėtis orinio srauto atžvilgiu pasiekia kampinę 12–14° ribą, generuojamas elektrinis signalas ir aktyvuojamas greičio praradimo įspėjimas. Daviklis, be to, pašildomas, kad skrydžio metu visais atžvilgiais liktų veikiantis.



2.7.22 pav. Alfa daviklio konstrukcija

Daviklio fiksuojanti jungtis per sukimosi centrą susieta su skaitmenine orinio greičio praradimo įspėjamąja sistema, kurios sandara pavaizduota 2.7.23 pav.



2.7.23 pav. Skaitmeninės orinio greičio praradimo įspėjamosios sistemos sandara

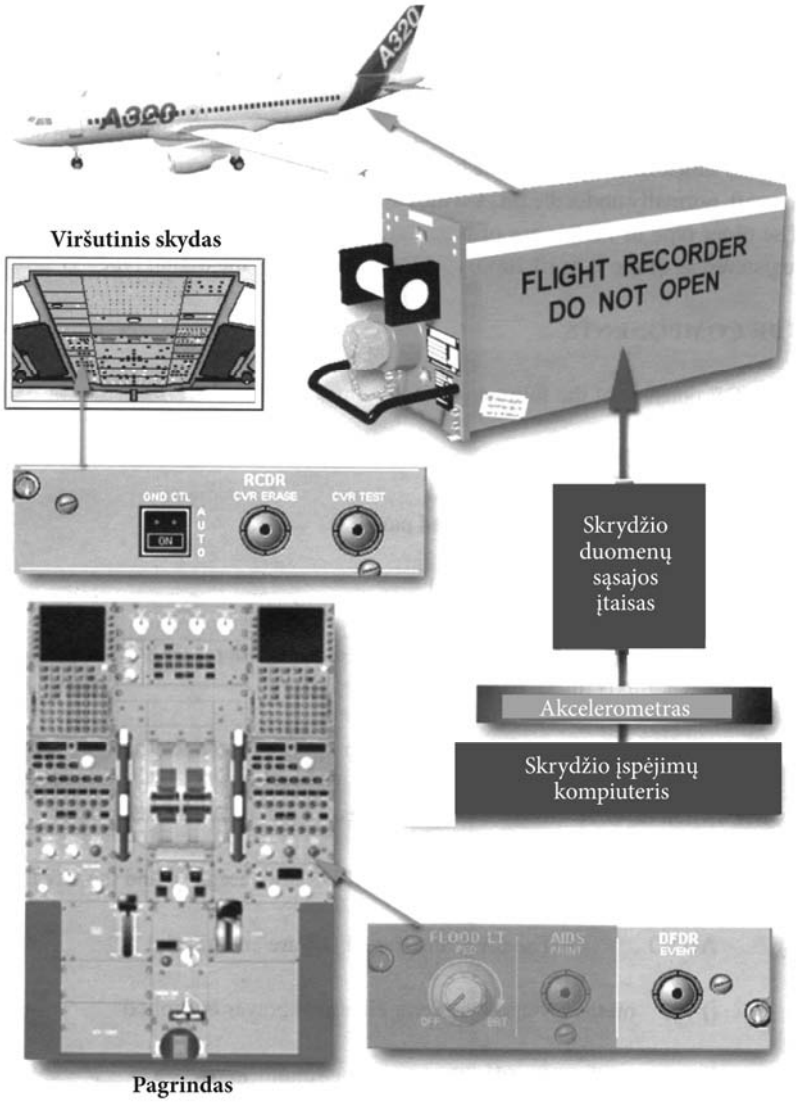
Sistemoje paprastai yra du nepriklausomi skaitmeniniai kompiuteriai, kurie apskaičiuoja greičio praradimą, atitinkantį atakos kampų reikšmes, užsparnių padėtį ir trauką. Kompiuteriai priima signalus iš atakos kampo daviklio (***alfa daviklio***), užsparnių padėties daviklio, indikatorių N_1 ir N_2, jungiklio oras-žemė, oro duomenų kompiuterio ir pagrindinės kritiškos padėties modulio.

Įspėjamoji greičio praradimo sistema turi savikontrolės galimybę, leidžiančią imituoti kritiškas atakos kampo reikšmes, sukeliančias orinio greičio praradimo situacijas, ir patikrinti su tuo susietas sistemos įspėjamąsias reakcijas.

2.7.7. Skrydžio duomenų registravimas

Šiuolaikiniai komerciniai orlaiviai aprūpinti elektroninėmis ***skrydžio duomenų*** registravimo priemonėmis, kaupiančiomis įvairius orlaivio parametrus per visą skrydžo trukmę. Tai orlaivio variklio sūkių dažniai, dujų temperatūra, vibracijų lygis, valdymo plokštumų ir važiuoklės padėtys, degalų tiekimas, degalų, tepalo bei hidraulinio skysčio slėgis ir dar daugelis kitų orlaivio sistemų veikimą apibūdinančių dydžių, vadinamų skrydžio duomenimis. Skrydžio duomenų registratoriai *Flight Date Recorder* (FDR) mažesniuose orlaiviuose atlieka ir ***ryšio duomenų*** įrašymo funkcijas, t. y. įrašo pilotų pokalbius tarpusavyje, su kitais įgulos nariais bei su Žemėje esančiomis tarnybomis ir kitais orlaiviais.

Skrydžio duomenų registravimo laikas skaitmeniniame atminties įrenginyje, kuris yra konteineryje, vadinamame juodąja dėže, nors iš tikrųjų jis nudažytas ryškia oranžine spalva, sudaro 10 arba 25 val. Konteineryje sukaupta informacija turi išlikti po avarijų ir katastrofų, todėl yra gaminamas iš titano ir padengiamas temperatūrai atsparia keramika. Konteineris turi išlaikyti smūgius iki 1000 g, jame informacija privalo išlikti net 30 min deginant vieną jo pusę liepsna, kurios temperatūra 1100 °C. Prie konteinerio tvirtinamas povandeninis signalizatorius: nukritus orlaiviui į vandenį, signalizatoriaus baterijos prisipildo vandens, atsiranda signalizatoriaus maitinimas, ir jis pradeda siųsti akustinius 37,5 kHz. dažnio signalus, kad pagal juos būtų galima po vandeniu surasti konteinerį. Kai kurie FDR tipai turi magnetinio įrašymo priemones, tačiau nuo 2000 m. balandžio 1 d., pagal ICAO standartus, naudotinos tik skaitmeninės skrydžio duomenų registravimo sistemos (2.7.24 pav.).



2.7.24 pav. Skaitmeninis skrydžio duomenų registravimas

Į skaitmeninės skrydžio duomenų registravimo sistemos sudėtį įeina:
– registracijos priemonės;
– valdymo įrenginys prie viršutinio skydo;
– valdymo įrenginys prie pagrindo skydo.

Registracijos priemonės jungia skaitmeninį skrydžio duomenų registratorių (DFDR), skrydžio duomenų sąsajos įrenginį (FDIU) ir triašį tiesinį akcelerometrą (LA).

Valdymo įrenginys prie ***viršutinio skydo*** valdo ir pilotų kabinos garso registratorių (CVR) dviem ON arba AUTO valdymo režimais:

1. ON, kada CVR ir DFDR maitinami įjungus jungiklį ON.
2. AUTO, kada kaupikliai CVR ir DFDR orlaivyje įsijungia ir išsijungia automatiškai:

– Žemėje, įjungus elektrinį maitinimą;
– Žemėje, pastūmus bet kurio variklio paleidimo svirtį iš „Stop“ padėties arba padidėjus tepalo slėgiui bet kuriame variklyje, jį paleidžiant;
– skrydžio metu (veikiant jėgainei).

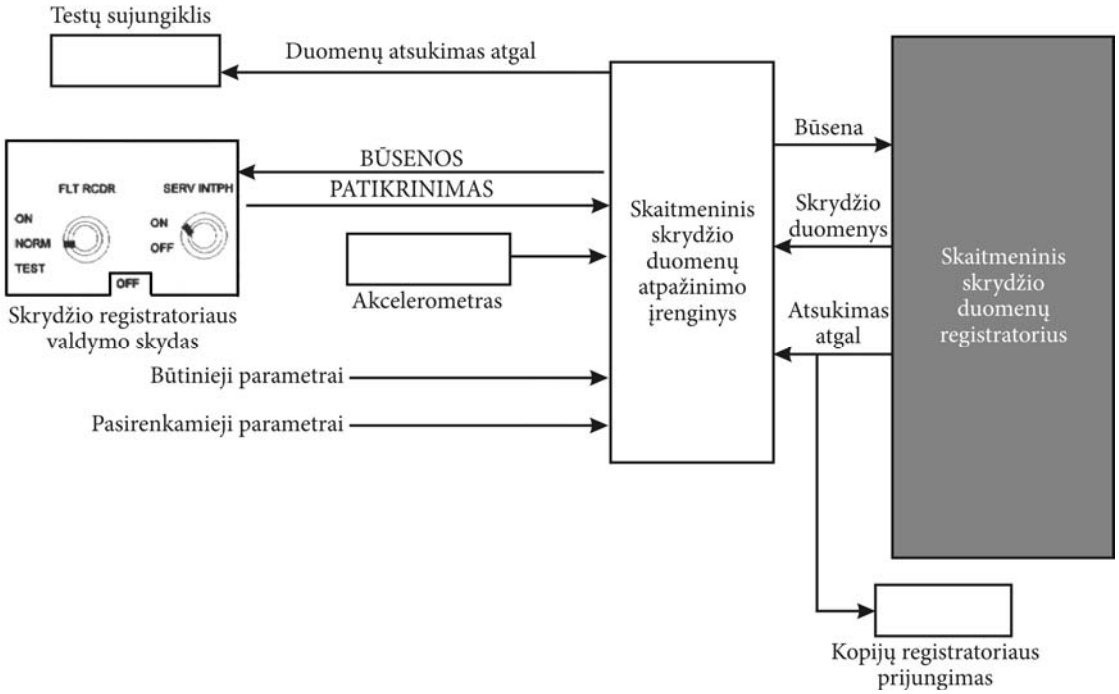
Įrenginys ***prie pagrindo*** valdymą atlieka paprastai, paspaudus mygtuką, pažymėtą „EVENT“, DFDR registratoriuje įsijungia režimas „Įvykis“. Tai reiškia, kad nuo to momento DFDR atlieka greitą tolesnių registruojamųjų įvykių analizę.

Prieš skrydį registratoriaus valdymo pulte reikia nustatyti skrydžio datą, numerį ir tikslų laiką. Avarijos atveju kaupikliai gali išsijungti automatiškai, tada jų sudėtyje yra inercinis išjungiklis, kuris suveikia nuo didelio smūgio, orlaiviui atsitrenkus į Žemę.

Skaitmeninės skrydžio duomenų registracijos sistemos, naudojamos orlaivyje Boeing 767, blokinė schema pateikta 2.7.25 pav. Tokie kaupikliai gali įrašyti keletą dešimčių skrydžio duomenų. Signalus iš įvairių orlaivio įrenginių ir sistemų surenka, apdoroja ir paruošia įrašyti registratoriaus sudėtyje esantis elektroninis blokas FDAU. Įrašomi duomenys yra dviejų rūšių: ***nuolatiniai signalai ir vienkartinės komandos***.

Nuolatiniai signalai iš orlaivio įrenginių ir prietaisų rašomi visą laiką, kol įjungtas kaupiklis. Vienkartinės komandos yra orlaivio įrenginių jungimo signalai (pavyzdžiui, autopilotas įjungtas, važiuoklė išleista) ir signalai, atsirandantys tik nenormaliai veikiant orlaivio įrenginiams ar sistemoms. Tokiuose kaupikliuose yra laikrodis, siunčiantis visiems kitiems kaupikliams laiko signalus.

Avariniai kaupikliai orlaivyje dažniausiai yra uodegoje, nes ten didesnė tikimybė jiems išlikti nepažeistiems po avarijų ar katastrofų. Didesniuose orlaiviuose gali būti keli vienodi kaupikliai, tada didesnė tikimybė, kad vienas iš jų išliks po katastrofos. Signalizatorius gali veikti net 5 km gylyje maždaug mėnesį, signalas girdimas kelių kilometrų atstumu. Reikalavimai avarinei duomenų kaupimo aparatūrai nurodyti ICAO dokumentuose. Avariniuose kaupikliuose sukaupta informacija po orlaivio avarijos ar katastrofos analizuojama laboratorijose, naudojant sudėtingą aparatūrą.

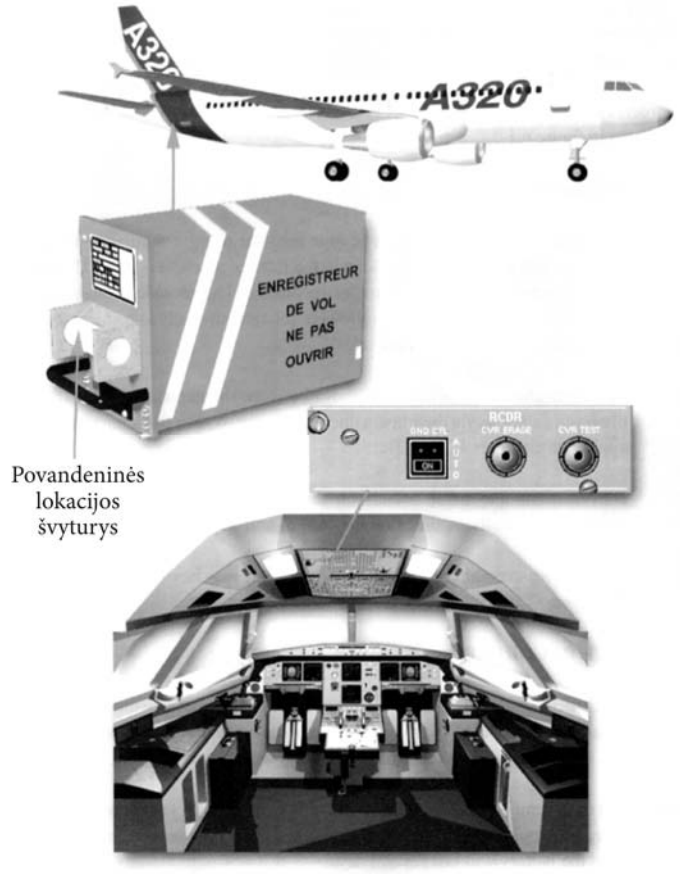


2.7.25 pav. Skaitmeninės skrydžio duomenų registracijos sistema

Didinamas tokių kaupiklių konteinerių atsparumas smūgiams iki 6000 g, jie nesugniūžta, prislėgus juos 2 t svoriu iš bet kurios pusės. Konteineriai išlaiko 1100 °C temperatūrą 1 val. o dar po 10 val. – 260 °C temperatūrą, kas panašu į realias sąlygas, orlaiviui degant ant Žemės. Duomenų kaupikliai vystosi dviem kryptimis. Dideliems orlaiviams skirtuose kaupikliuose greta skrydžio ir ryšio duomenų skaitmeninėje atmintinėje pradedama įrašyti kabinos vaizdo informaciją. Atsiranda kaupiklių, kurie skirti mažiems orlaiviams, kokių anksčiau nebuvo. Šiuose orlaiviuose reikia įrašyti tik keletą skrydžio duomenų ir nėra tokių didelių reikalavimų informacijos apsaugai nuo smūgių ir temperatūros, todėl tokie kaupikliai yra maži, lengvi ir pigesni.

2.7.8. Pilotų kabinos garso registratorius

Ryšio duomenų garso registratoriai (2.7.26 pav.) atskirai (skirtinguose magnetinės juostos takeliuose) įrašo kairiojo ir dešiniojo pilotų tarpusavio pokalbius, signalai gaunami iš orlaivio vidaus ryšio sistemos.



2.7.26 pav. Pilotų kabinos garso registratorius

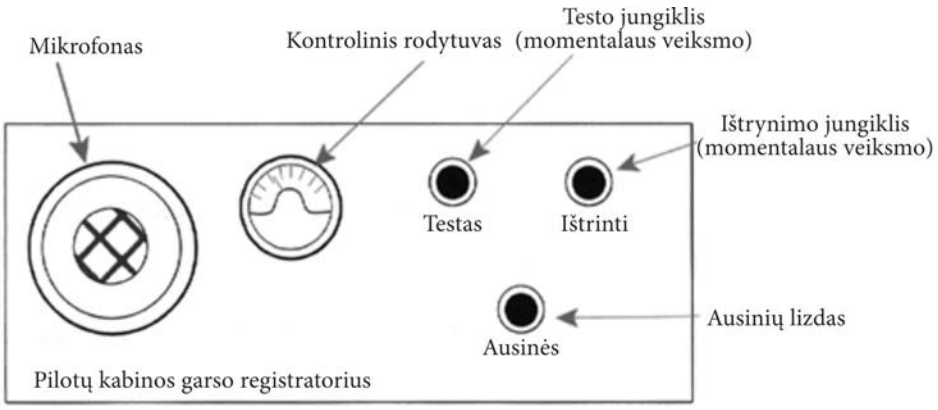
Atskirai nuo pilotų pokalbių iš pilotų kabinoje esančio mikrofono įrašomi visi joje esantys garsai: pilotų tarpusavio pokalbiai, pokalbiai su įėjusiu asmeniu ir triukšmai. Ketvirtajame juostos takelyje įrašomi laiko signalai, gauti iš ryšio ir skrydžio duomenų kaupiklio. Pagal įrašytus laiko signalus galima sugretinti skirtinguose kaupikliuose įrašytus duomenis.

Kai po skrydžio orlaivis jau yra aikštelėje ir įjungti jo stovėjimo stabdžiai, visą ryšio informaciją galima ištrinti nuspaudus mygtuką valdymo pulte. Jei skrydžio metu buvo pastabų dėl ryšio, ištrinti tokią išlikusią informaciją draudžiama.

Kadangi apsaugotą konteinerį po kiekvieno skrydžio nepatogu atidarinėti, orlaivyje neapsaugotam įrašymui vartojama atskira aparatūra (eksploataciniai kaupikliai) su paprasta magnetine juostele kasetėje.

Eksploataciniai ryšio duomenų registratoriai atskirai įrašo orlaivio vado ir antrojo piloto pokalbius, pilotų kabinos garsus iš joje esančio mikrofono, laiko signalus, t. y. jie kaupia tą pačią informaciją, kaip avariniai, tik ilgiau, ne mažiau kaip 24 val. Tokio registratoriaus valdymo skydas parodytas 2.7.27 pav.

Po skrydžio kasetė gali būti išimta ir antžeminės tarnybos su specialia aparatūra joje sukauptą informaciją perrašo į kompiuterį.



2.7.27 pav. Pilotų kabinos garso registratoriaus valdymo skydas

Tada informacija peržiūrima (iššifruojama) vartojant specialią programinę įrangą. Kompiuterio vaizduoklyje skrydžio duomenys (variklio sūkių dažniai, vibracijų lygis, slėgiai sistemose, valdymo plokštumų padėtys ir dar kelios dešimtys kitų) rodomi skirtingų spalvų ir formų linijomis, rodoma laiko linija. Įrašytų duomenų reikšmes galima išmatuoti bazinės linijos atžvilgiu. Pagal įrašytus laiko signalus galima nustatyti ką ir kada sakė pilotai, kada ir kokios buvo duomenų reikšmės, kada atsirado vienkartinės komandos.

3. VARIKLIŲ PARAMETRŲ MATAVIMO PRIETAISAI

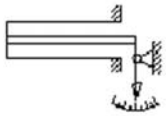
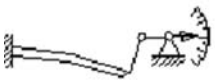
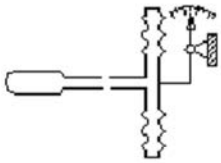
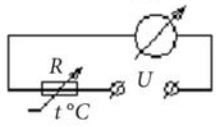
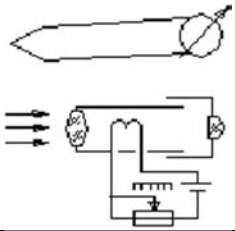
3.1. Termometrai

3.1.1. Paskirtis ir klasifikavimas

Termometrai plačiai naudojami aviacijoje, jais matuojama kietųjų kūnų (pavyzdžiui, cilindrų galvučių stūmokliniuose varikliuose), skysčių (pavyzdžiui, alyvos) ir dujų temperatūra. Matuojant variklių mazgų ir išmetamųjų dujų temperatūrą, paklaidos neturi viršyti 0,5–1 %. Matuojant alyvos ir oro temperatūrą, pakanka 1–2 % matavimo tikslumo.

Pagal veikimo ***principą*** termometrai skirstomi į 7 pagrindines grupes, kurios pateiktos 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. Termometrų klasifikavimas

Termometro principas	Veikimo principas	Principinė schema	Matuoja °C
Plėtimosi	Medžiagos santykinio tūrio priklausomybė nuo temperatūros		nuo −70 iki +750
Skysčio dilatometro	Medžiagos santykinio tūrio priklausomybė nuo temperatūros		nuo −60 iki +900
Bimetalo	Bimetalo plokštelės deformacijos priklausomybė nuo temperatūros		nuo −60 iki +250
Manometro	Slėgio priklausomybė nuo temperatūros		nuo −50 iki +400
Varžos	Jutiklio varžos priklausomybė nuo temperatūros		nuo −270 iki +1000
Termoelektros	Termoelektrovaros jėgos priklausomybė nuo temperatūros		nuo −260 iki +2500
Pirometro	Šiluminio spinduliavimo priklausomybė nuo temperatūros		nuo +600

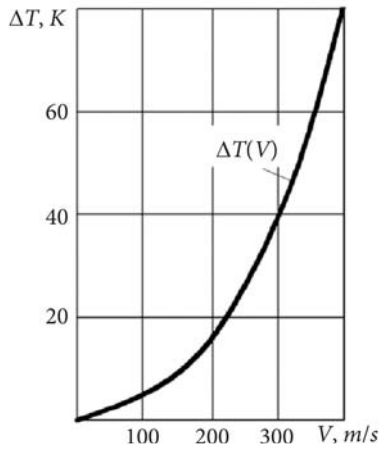
Aviacijoje plačiausiai naudojami termometrai su ***varžos, termoelektrinių porų, bimetalo juostelių*** ir ***pirometriniais*** temperatūrai jautriais elementais (TE).

Matuojant dideliais greičiais judančių ***dujų*** temperatūrą, atsiranda paklaidų, kurias lemia dujų srauto stabdymas TE buvimo vietoje, dėl to kinetinė dujų energija virsta šilumine. Termometro jautraus elemento temperatūra tampa didesnė už statinę dujų temperatūrą. Dujų srauto temperatūros padidėjimo ΔT jo stabdymo metu statinės temperatūros T_a atžvilgiu priklausomybė nuo srauto greičio pateikta 3.1.1 pav.

Iš šios priklausomybės matyti, kad ignoruoti dinaminę srauto stabdymo temperatūros paklaidą (ΔT) galima tik tada, kai dujų srauto greitis mažesnis nei 100 m/s. Be to, temperatūros ΔT padidėjimas priklauso nuo TE ***formos*** ir jo ***padėties*** sraute. Tai gali būti įvertinama atitinkamu stabdymo koeficientu r. Įvertinus stabdymo koeficientą, TE temperatūra bus:

$$T_D = T_S(1 + 0{,}2\, r\, M^2)\,, \tag{3.1}$$

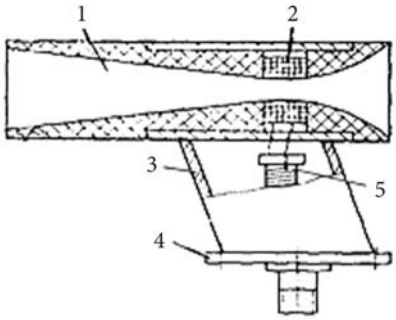
čia T_S - aplinkos statinė temperatūra; M – Macho skaičius.



3.1.1 pav. Temperatūros padidėjimo priklausomybė nuo oro srauto greičio

Geresniu laikytinas toks TE, kurio stabdymo koeficientas *r* yra pastovesnis ir mažiau skiriasi nuo vieneto. Dujų srauto greičio įtakai, matuojant temperatūrą, sumenkinti siekiama arba stabilizuoti dujų greitį, arba gerokai jį sumažinti toje vietoje, kur įtaisomas temperatūros jutiklis.

Pirmuoju atveju (3.1.2 pav.) TE *2,* izoliuotas nikelio laidas, apvyniotas ant varinio cilindro, yra siaurame Lavalio tūtos *1* skerspjūvyje.



3.1.2 pav. Išorinio oro termometro principinė schema:
1 – Lavalio tūta; 2 – TE; 3 – šlaitas; 4 – pagrindas; 5 – derinimo varžas

Siaurame tūtos *1* skerspjūvyje, kai orlaivio greitis yra $M \geq 0{,}5$, oro srauto greitis tampa lygus garso greičiui ore. Tokį temperatūros jutiklį apibūdina pastovus ***kompensacinis kokybės koeficientas***:

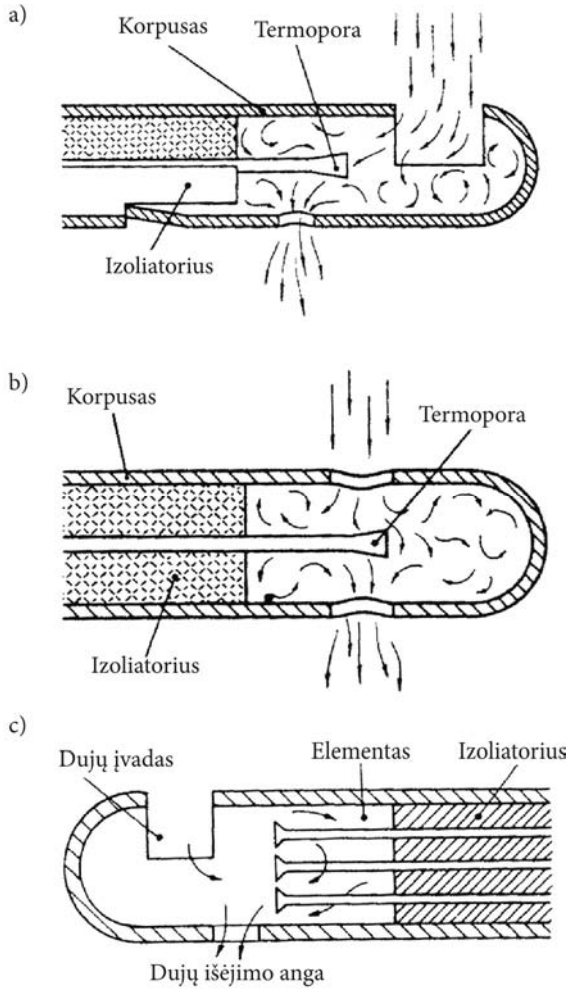
$$N = \frac{T_D}{T_S} = \frac{5 + rM^2}{5 + M^2} = 0{,}978. \tag{3.2}$$

Tada išmatavus temperatūros jutiklio temperatūrą T_D, galima apskaičiuoti oro ***statinę*** temperatūrą:

. $$T_s = \frac{T_k}{N\left(1 + 0{,}2M^2\right)}. \tag{3.3}$$

Antruoju atveju, pavyzdžiui, išmetamųjų dujų srauto TE įtaisomas į stabdymo kamerą (3.1.3 pav.).

Stabdymo kameros korpusas (3.1.3 pav., b) atsparus temperatūrai. Jame terminiu izoliatoriumi tvirtinamas TE, pavyzdžiui, termopora (3.1.3 pav., a). Korpuse yra viena mažo skersmens ir viena didesnio skersmens arba dvi vienodos angos. Krintantis dujų srautas patenka į kamerą pro didesnio skersmens angą, ten stabdomas, lėtai apteka TE ir išspaudžiamas pro mažo skersmens angą (3.1.3 pav., c). Kai įėjimo ir išėjimo angų plotų santykis ≥5, tokio keitiklio stabdymo koeficientas *r* lygus 0,92–0,96. 3.1.3 pav. parodytas kitas stabdymo kameros variantas, kuriame įėjimo ir išėjimo angos vienodo skersmens.



3.1.3 pav. Dujų srauto termometro su stabdymo kamera principas:
a, c – kameros su skirtingo dydžio angomis; b – kamera su vienodo skersmens angomis

Matuojant bet kurios aplinkos temperatūrą, pastebimas termometro rodmenų ***delsimas***. Dėl šio efekto atsirandančios dinaminės paklaidos reikšmė priklauso nuo temperatūros matavimo būdo ir TE laiko pastoviosios τ, kuri nustatoma pagal formulę:

$$\tau = \frac{c \cdot m}{Sk_T}, \tag{3.4}$$

čia *c, m, S* – atitinkamai TE šiluminė talpa, masė ir plotas; k_T – šilumos atidavimo koeficientas.

Dinaminei paklaidai sumažinti mažinama TE laiko pastovioji. Tai pasiekiama mažinant (3.1.3 pav.) temperatūrai jautraus elemento masę ir šiluminę talpą bei didinant jo sąlyčio su aplinka paviršiaus plotą ir šilumos atidavimo koeficientą. Dinaminė paklaida taip pat priklauso nuo TE aptekančių dujų masės. Jai mažėjant, paklaida didėja.

3.1.2. Elektriniai varžos termometrai

Elektriniai varžos termometrai aviacijoje naudojami alyvos ir oro temperatūrai orlaivio kabinoje ir jos išorėje matuoti. Šių termometrų veikimo principas pagrįstas laidininkų ir puslaidininkių elektrinės varžos priklausomybe nuo temperatūros.

Vielinio TE varžos R priklausomybė nuo temperatūros, kai jos kitimo diapazonas nedidelis, yra tiesinė ir aprašoma lygtimi:

$$R = R_0(1+ \alpha\cdot\Delta t), \tag{3.5}$$

čia R_0 – varža, kai temperatūra 0°C; α – temperatūrinis varžos koeficientas; Δt – temperatūros pokytis.

TE ***jautris*** priklauso nuo pradinės varžos ir medžiagos temperatūrinio varžos koeficiento (TVK). Dažniausiai, kai tenka matuoti nuo –70 °C iki +300 °C skysčių ir dujų temperatūrą, aviaciniuose elektriniuose varžiniuose termometruose naudojamas nikelio laidas. Jo didelė santykinė varža ($0{,}12\cdot10^{-6}\,\Omega\cdot$m) ir pakankamai didelis TVK ($6{,}4\cdot10^{-3}$ K^{-1}). Esminis ***nikelio*** laido trūkumas – priemaišų įtaka jo TVK. Todėl TE identifikuoti nuosekliai nikelio vielos rezistoriui R_0 jungiamas rezistorius R_m iš medžiagos, kurios TVK mažas (***manganino*** laidas).

TE, kuriame rezistoriai sujungti nuosekliai, TVK galima nustatyti pagal formulę:

$$\alpha_k = \alpha\frac{R_0}{R_0 + R_m}. \tag{3.6}$$

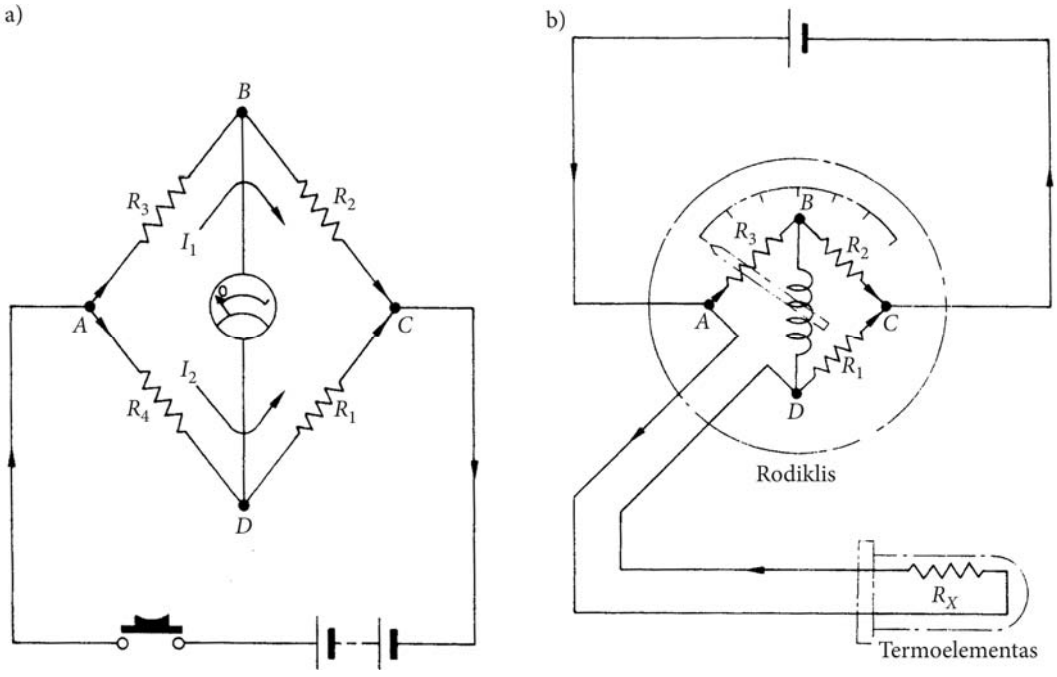
Iš (3.6) formulės matyti, kad $\alpha_k < \alpha$. Keičiant rezistorių R_0 ir R_m santykį, galima pasiekti, kad visų TE α_k būtų vienodas.

Platininis laidas TE naudojamas tada, kai būtini labai stabilūs aviaciniai termometrai. Pastaruoju metu naudojami ir ***puslaidininkiniai*** TE. Jų priklausomybė nuo t° nustatoma pagal lygtį:

$$R = A\cdot e^{\frac{B}{T}}, \tag{3.7}$$

čia T – absoliučioji termodinaminė temperatūra; A ir B – koeficientai, priklausantys nuo TE medžiagos ir matmenų.

Skysčių ir dujų temperatūrai matuoti naudojami unifikuoti elektriniai varžo termometrai su vieliniais ir puslaidininkiniais TE, ***išorinei oro*** temperatūrai – su vieliniais TE. Šių tipų termometrų principinės schemos yra praktiškai vienodos. TE varža R_x, kintant temperatūrai $t°$, matuojama dvigubu pastoviosios srovės tilteliu, kurio elektrinė schema pateikta 3.1.4 pav., a, jungiant į tiltelio įstrižainę magnetoelektrinį santykio matuoklį – logometrą, kuris atlieka temperatūros matavimų rodiklio funkciją, kadangi tiltelio srovės, tekančios santykio matuoklio ritėmis, priklauso nuo TE temperatūros.



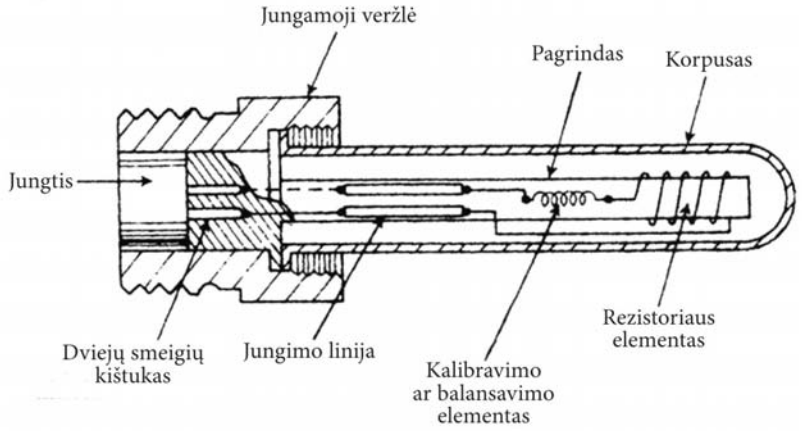
3.1.4 pav. Varžo termometro elektrinė schema: a – matavimų principinė schema; b – termometro elektrinė schema

TE, įmontuotas į specialų korpusą, tampa termometro davikliu (TD) 3.1.5 pav.

Be daviklio, į aviacinio termometro sudėtį įeina matavimų rodiklis. Orlaivio kabinoje dėl vietos stokos retai naudojami prietaisai vien tik lauko oro temperatūrai rodyti. Dažniausiai vartojami sugretinti duomenų atvaizdavimo prietaisai, kuriuose greta kitų rodmenų, pavyzdžiui, tikrojo orinio greičio, rodoma oro srauto ir statinio oro temperatūra.

Elektriniai varžo termometrai priklausomai nuo TE tipo matuoja temperatūrą:

– su vieliniu TE, diapazone nuo –70 °C iki +150 °C, kai Δt intervale (–40 °C – +130 °C) pagrindinė paklaida neviršija ±3 %;
– su puslaidininkiniu TE – nuo 0 °C iki +120 °C, kai paklaida normaliomis sąlygomis neviršija ±2 °C.

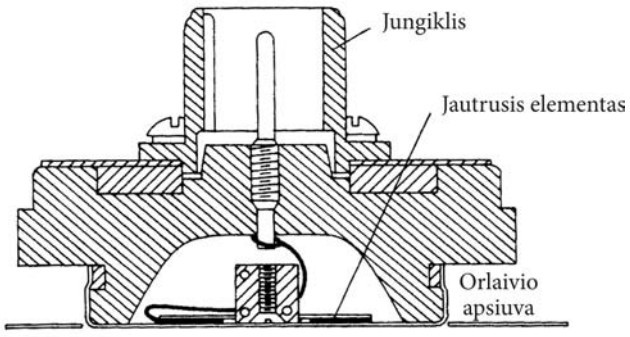


3.1.5 pav. Tipinė varžo termometro daviklio sandara

Išorinio oro termometras. Oro temperatūra yra vienas iš pagrindinių parametrų, naudojamų kontroliuojant gyvybiškai svarbias orlaivio ir jėgainės funkcionavimo charakteristikas skrydžio metu. Orlaivio išorinio oro temperatūros žinojimas reikalingas matuojant tikrąjį orini greitį, variklių traukos parametrus, oro bei degalų tiekimo sistemų charakteristikas ir t. t.

Egzistuoja tokios išorinio oro temperatūros sampratos: statinė oro temperatūra T_D – SAT (*Static ait temperature*) – tai netrikdyto atmosferos oro temperatūra, kuri tiesiogiai matuojama, kai orlaivio orinis greitis yra $M < 0{,}2$; dinaminė oro srauto temperatūra T_D – RAT (*Ram air temperature*), kai orlaivio greitis yra $M > 0{,}2$, nustatoma, pavyzdžiui, Lavalio tūtos pavidalo davikliu, matuojančiu T_S ir T_D, o didėjant orlaivio greičiui, arti leistinosios ribos dinaminė oro temperatūra pasiekia maksimumą ir vadinama totaline oro srauto temperatūra T_T – TAT (*Total air temperature*).

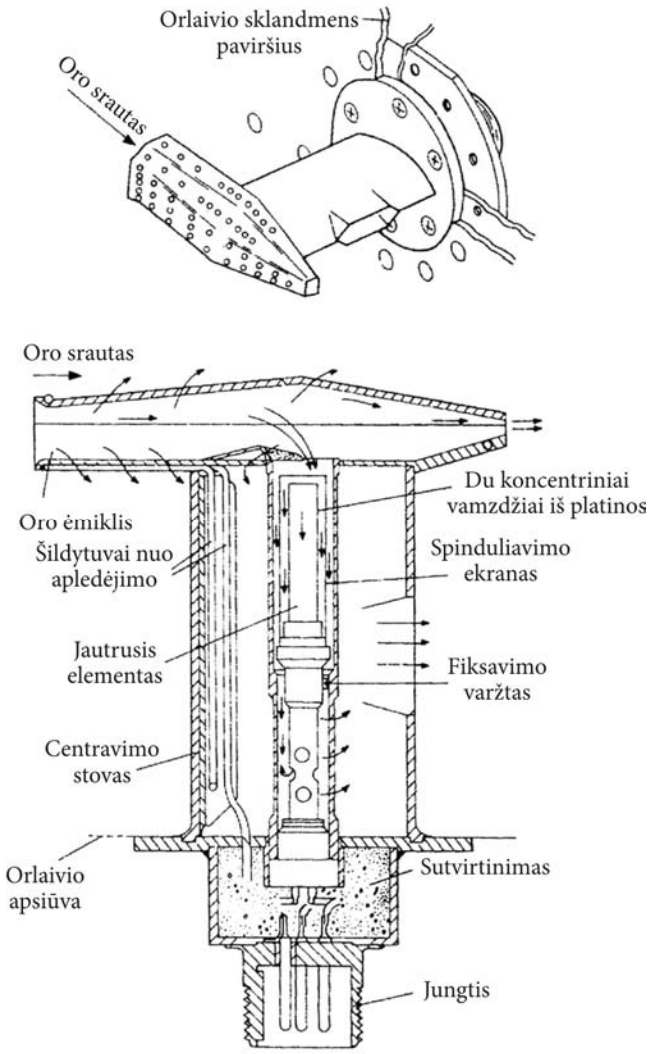
Daugumoje statinės oro temperatūros matavimo daviklių naudojama platininė viela TE daviklio korpuse, panašiame į taikomą skysčių temperatūrai matuoti. Toks daviklio korpusas primena kolbos formą ir vadinamas „srauto kolba“, tvirtinama angoje, padarytoje orlaivio sklandmens paviršiuje taip, kad jos darbinis paviršius būtų orlaivio apsiuvos lygyje 3.1.6 pav.



3.1.6 pav. Dinaminio temperatūros daviklio „srauto kolba“ konstrukcija

Priklausomai nuo matmenų ir geometrijos tokio daviklio kompensacinis kokybės koeficientas, reikalingas statinei oro temperatūrai apskaičiuoti, kinta nuo 0,75 iki 0,90.

Išorinio oro temperatūrai T_S ir T_D matuoti skirtame „Lavalio tūtos“ daviklyje naudojamas platininis dviejų koncentrinių vamzdžių pavidalo TE (3.1.7 pav.), įtaisytas tūtos korpuso ir tuščiavidurio šlaito sujungimo vietoje. Korpusas pritvirtintas prie pagrindo tuščiaviduriu šlaitu. Daviklis tvirtinamas orlaivio išorėje taip, kad išilginė jo korpuso ašis sutaptų su aptekančio oro srauto kryptimi. Tokio daviklio kompensacinis kokybės koeficientas praktiškai lygus ***vienetui***.



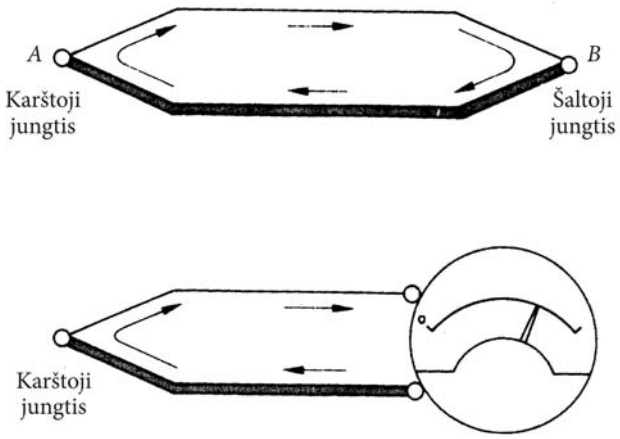
3.1.7 pav. Išorinio oro temperatūros daviklio konstrukcija:
viršuje – Lavalio tūtos tvirtinimo schema; apačioje – daviklio sandara

Elektrinė termometro schema atitinka tipinę schemą pateiktą 3.1.4 pav. Tai keturių pečių nesubalansuotas tiltelis su magnetoelektriniu santykio matuokliu. Matuojama temperatūra nuo –60 °C iki +150 °C. Pagrindinė matavimo paklaida mažesnė nei ±4 °C.

3.1.3. Termoelektriniai termometrai

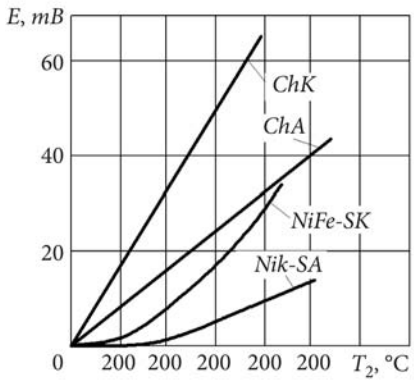
Orlaivio reaktyvinio variklio tūtos ir kitų jėgos agregatų bei jų išmetamųjų dujų srauto temperatūra matuojama termoelektriniais termometrais.

Termoelektrinio termometro veikimo ***principas*** pagrįstas tuo, kad iš skirtingų medžiagų pagamintų dviejų laidininkų, vadinamų termopora, sandūroje, esant temperatūros skirtumui tarp jungimo vietos ir laisvųjų laidininkų galų, atsiranda ***terminė*** elektrovaros jėga (EVJ) (3.1.8 pav.).



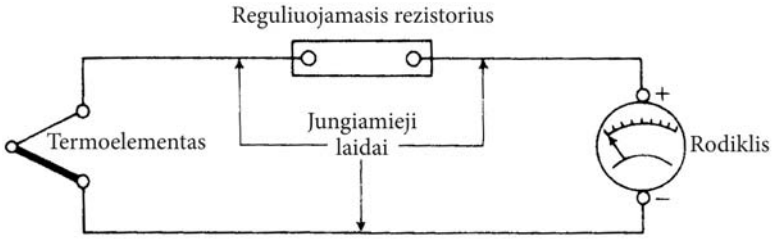
3.1.8 pav. Termoporos principas

Laidininkų jungtis, besiliečianti su įkaitusiais objektais, vadinama ***karštąja*** jungtimi, o priešinga – ***šaltąja***, arba laisvąja jungtimi. Teigiamuoju (arba pirmuoju) termoporos šaltosios jungties elektrodu laikomas tas, nuo kurio teka terminės EVJ sukelta srovė (3.1.9 pav.). Kitas termoporos šaltosios jungties elektrodas vadinamas neigiamuoju (arba antruoju). Teoriškai aprašyti termoporoje atsirandančios terminės EVJ priklausomybę nuo jos karštosios ir šaltosios jungčių temperatūros skirtumo yra sudėtinga, todėl ji nustatoma eksperimentiniu būdu ir pateikiama lentelių arba grafikų pavidalu.



3.1.9 pav. Termoporų terminės EVJ priklausomybė nuo karštosios jungties temperatūros: *ChK* – chromelis-kopelis; *ChA* – chromelis-aliumelis; *NiFe-SK* – nikelis, geležis-specialusis kopelis; *NiK-SA* – nikelis, kobaltas-specialusis aliumelis

Termoelektriniai termometrai sudaromi iš vieno ar daugiau TE ir temperatūros rodiklio (3.1.10 pav.).



3.1.10 pav. Termoelektrinio termometro principinė schema

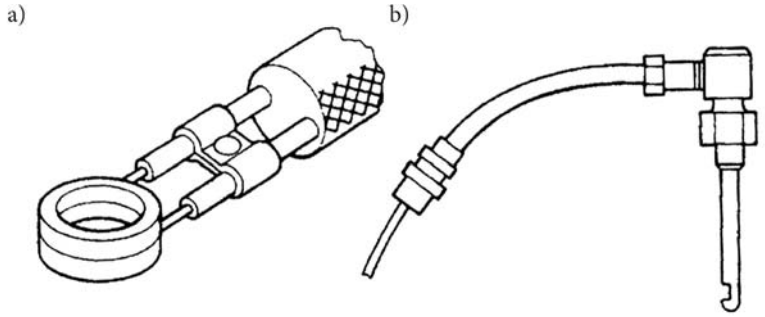
Pagal matavimų paskirtį jie ***skirstomi*** į tris pagrindines grupes. Tai termometrai, matuojantys:
– variklių stūmoklių, cilindrų galvučių ir kitų kietųjų kūnų temperatūrą;
– greitai judančių dujų temperatūrą;

– reaktyvinių variklių tūtų išmetamųjų aukštojo ir žemojo slėgio dujų temperatūrą.

Pirmosios grupės (kietųjų kūnų) termometruose naudojamas vienas TE su (ChK) termopora, kurios karštoji jungtis tvirtinama prie varinio žiedo (3.1.11 pav., a).

Varinis žiedas įstatomas po cilindrinio variklio uždegimo žvake arba po varžtu ant orlaidžių ir pan. Sudaromas geras terminis sąlytis pagreitina matuojamosios objekto temperatūros perdavimą TE. TE išėjime terminė EVJ išmatuojama magnetoelektriniu milivoltmetru.

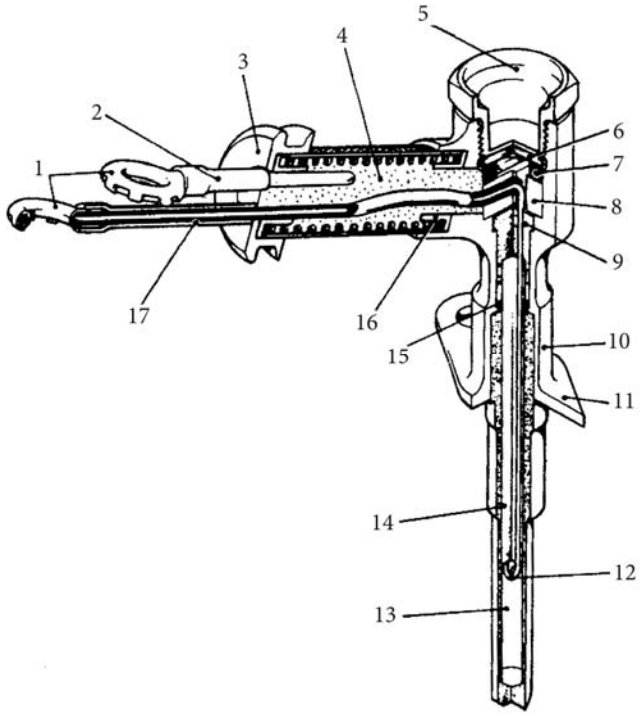
Termoelektrinių termometrų statinė gradavimo charakteristika priklauso nuo termoporos elektrodų medžiagos ir bendrosios matavimo grandinės varžos, todėl termometrų indikatorių ciferblatuose gali būti nurodoma: iš kokių medžiagų pagaminti termoporos elektrodai naudojami prietaise, pavyzdžiui, „Gr.ChK“ (gradavimas chromeliu-kopeliu); išorinės termometro grandinės varžos reikšmė.



3.1.11 pav. Termoelektrinių daviklių tipai:
a – žiedo; b – strypo su anga pavidalo

Antrosios grupės (išmetamųjų dujų) termometrų elektrinė schema analogiška pateiktai 3.1.10 pav. Atsižvelgiant į matavimų specifiką, termometrai skiriasi pagal termokeitiklių konstrukciją ir naudojamų termoporų tipą.

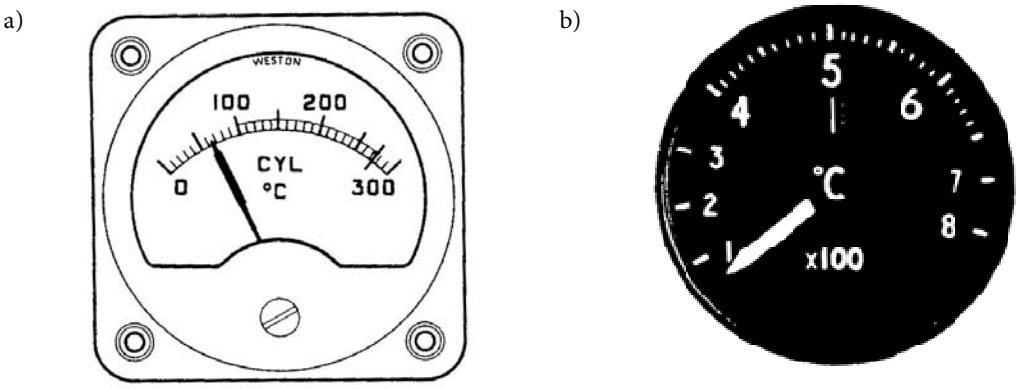
Pavyzdžiui, termometras, skirtas dujų temperatūrai matuoti turbininio starterio išėjime, turi TE su termopora iš lydinių (ChA), įtaisytą apsauginiame korpuse, kurio apatinėje dalyje yra anga (3.1.11 pav., a). Tokio keitiklio konstrukcija pateikta 3.1.12 pav.



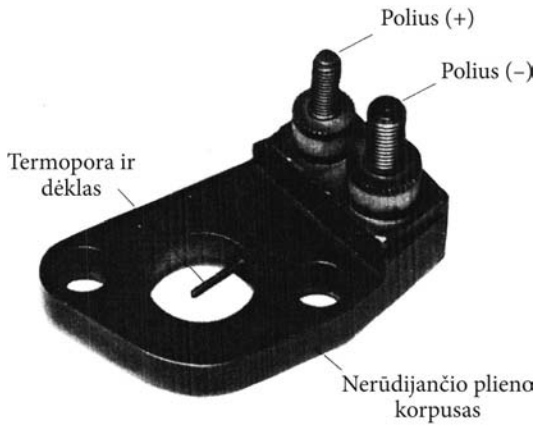
3.1.12 pav. Dujų srauto temperatūros daviklis: 1 – jungiamieji gnybtai; 2 – aliumelio elektrodas; 3 – dangtelis; 4 – silikono hermetikas; 5 – kamštis; 6 – žėručio tarpinė; 7,8 – keraminės apkabos; 9 – stiklinis tarpiklis; 10 – korpusas; 11 – tvirtinimo briauna; 12 – karštoji jungtis; 13 – strypas; 14 – keraminis izoliatorius; 15 – tarpiklis; 16 – mova; 17 – chromelio elektrodas

Kaip matavimų rezultatų rodiklis yra naudojamas milivoltmetras su strypiniu magnetu. Pirmosios ir antrosios termoelektrinių termometrų rodmenų indikacijos prietaisų pavyzdžiai pateikti 3.1.13 pav.

Yra keletas aviacinių variklių tipų, kurių priverstinio aušinimo sistemos išėjime matuojama aušinančio oro temperatūra. Tam naudojami chromelio-aliumelio TE, montuojami variklio ventiliacinės angos išėjime ir atliekantys maksimalios leistinosios išmetamojo oro temperatūros detektoriaus funkcijas. Tokio termodaviklio pavyzdys pateiktas 3.1.14 pav.



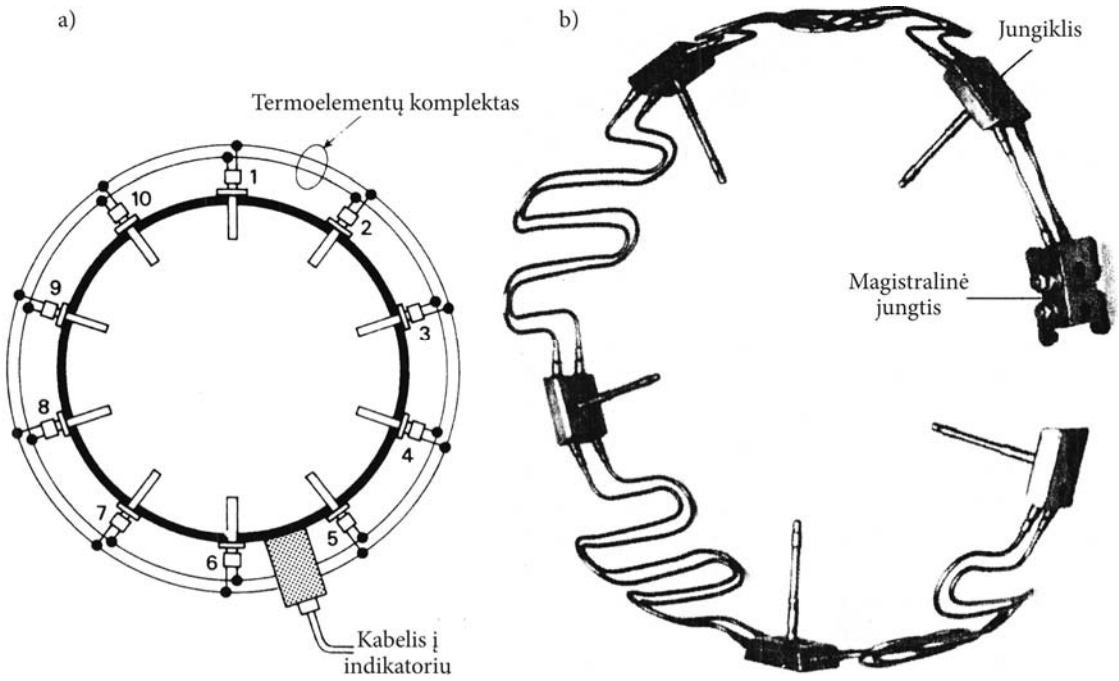
3.1.13 pav. Aviacinių termometrų indikatorių pavyzdžiai:
a – variklio cilindrų temperatūra; b – variklio turbinos išmetamųjų dujų temperatūra



3.1.14 pav. Aušinimo oro temperatūros daviklis

Siekiant išvengti matavimo paklaidų, priklausančių nuo TE parametrų išsibarstymo, kituose antrosios grupės termometruose TE grupuojami, jungiant lygiagrečiai penkis ar daugiau daviklių, norint išmatuoti vidutinę temperatūrą bendruoju matavimų rodikliu (3.1.15 pav., a).

Dalis šios grupės termometrų priklauso specializuotai išmetamųjų dujų termometrų serijai. Į tokių termometrų komplektą įeina TE su termoporomis iš NiK-SA ir NiFe-SK lydinių. TE įtaisomi karščiui atsparuose korpusuose (3.1.12 pav.) ir tvirtinami variklio išėjimo tūtos paviršiuje pagal ***perimetrą***. Greta montuojami davikliai, turintys tolimesnės ir artimesnės srities strypo pavidalo jutiklius. Taip išdėstytais ir lygiagrečiai sujungtais TE matuojama temperatūra, proporcinga išmetamųjų dujų ***vidutinei*** temperatūrai. TE sujungiami su matavimo grandine specialia jungtimi (SJ), esančia ten, kur aplinkos temperatūra kinta nežymiai ir neviršija 100 °C. Ekvivalentinė EVJ matuojama magnetoelektriniu didelio skalės mojo milivoltmetru su strypo tipo magnetu. Skalė (3.1.13 pav., b) paretinta pagrindinėje matavimų diapazono dalyje ir suspausta šalutinėse dalyse. Rodiklis prijungiamas prie SJ variniais mažos varžos laidais. Elektrinė tokio termometro schema standartinė, tik vietoj vieno jungiama grupė TE.



3.1.15 pav. Išmetamųjų dujų srauto termometrų grupiniai davikliai:
a – penkių TE porų grupė; b – penkių TE grupė

Trečiosios grupės termometrai yra pastovesni ir tikslesni. Šios grupės termometruose vieno ar kelių TE terminė EVJ sulyginama su pastoviosios srovės įtampa reguliuojamojo šaltinio išėjime. Tipinis šios grupės termometras matuoja nuo 300 °C iki 900 °C temperatūrą. Darbinio diapazono temperatūrų matavimo paklaida – ±3 °C.

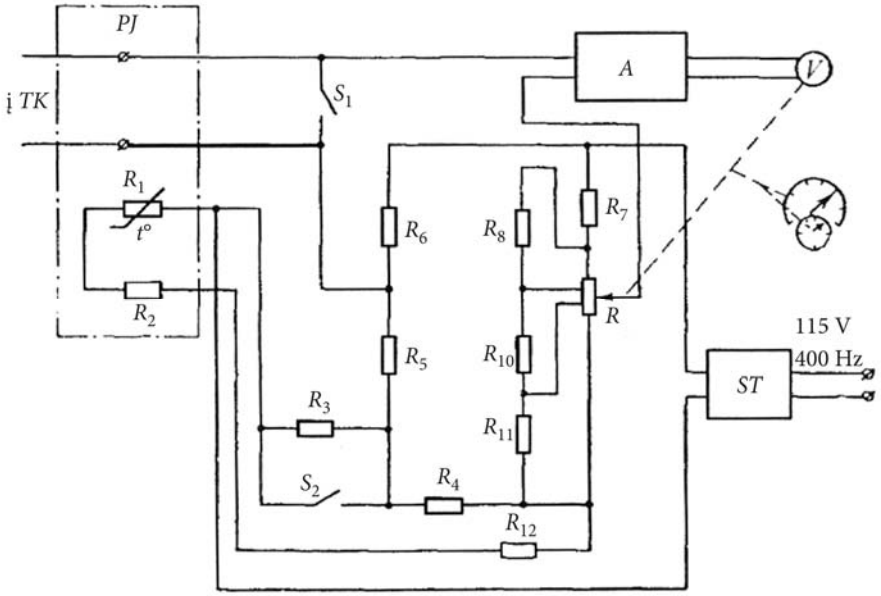
Į termometro 3.1.15 pav., b komplektą įeina grupė TE su dviem elektrodų NK-SA gradavimo deriniais. Grupė susideda iš penkių TE. Vieno TE elektrodų derinys naudojamas kaip temperatūros reguliavimo daviklis, kitų – tik temperatūrai matuoti. Visi TE – apsauginiuose korpusuose, su stabdymo kameromis, analogiškomis parodytoms 3.1.3 pav. Keturių nuosekliai sujungtų TE terminė EVJ elektrodų laidais perduodama į rodiklį, kuriame sumontuoti elektrinės matavimo schemos elementai. Rodiklis turi dvi skales ir dvi rodykles. Matuojant temperatūrą nuo 300 iki 900 °C, didžioji rodyklė juda apskritimo sektoriuje, o mažoji atlieka visą apsisukimą, kintant temperatūrai kiekvienu 20 °C. Didžiosios skalės padalos vertė – 20 °C, mažosios – 1 °C.

Dviejų kontūrų aviaciniuose varikliuose būtina kontroliuoti dujų temperatūrą dviejuose simetriniuose taškuose. Tokiu atveju taikoma matavimo schema su dviem nepriklausomais kanalais.

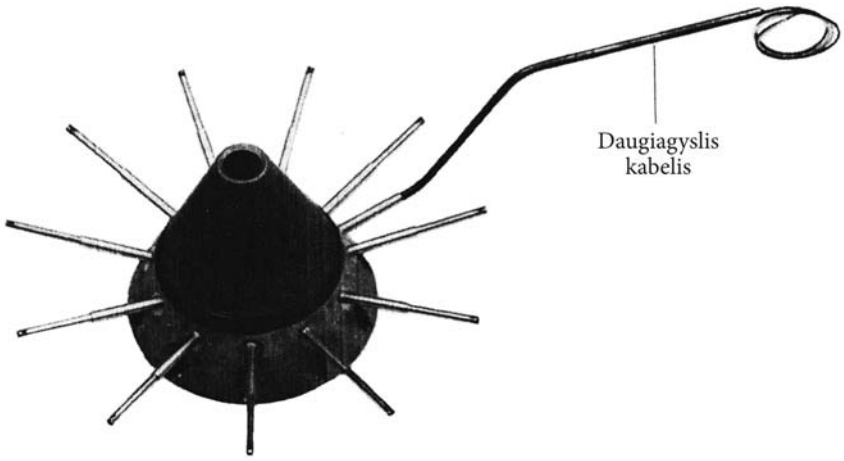
Kiekviename matavimo kanale panaudojama nuo 4 iki 40 termoporų su ChA tipo elektrodais. Šaltosios termoporų jungtys tarpusavyje sujungiamos pereinamąja jungtimi *PJ,* kurioje įtaisytas termistorius (3.1.16 pav.).

Grupinio temperatūros daviklio elementai įtvirtinami aplink stebulės pagrindą, kartu sudarydami vientisą tvirtą konstrukciją 3.1.17 pav. Termoporų elektrodai jungiami žiedu taip, kad vieno TE chromelio elektrodai būtų jungiami su gretimo TE chromelio elektrodais, o aliumelio elektrodai – su kito TE aliumelio elektrodais. Toks sujungtų TE žiedas juosia keramikinę stebulę, izoliuojančią juos vienas kito atžvilgiu. Stebulė, pagaminta iš magnio oksido miltelių, tarnauja TE elektrodams įtvirtinti ir izoliuoti. TE yra stabdymo kamerų korpusuose ir sujungti su matavimo schema daugiagysle pereinamąja jungtimi *PJ*.

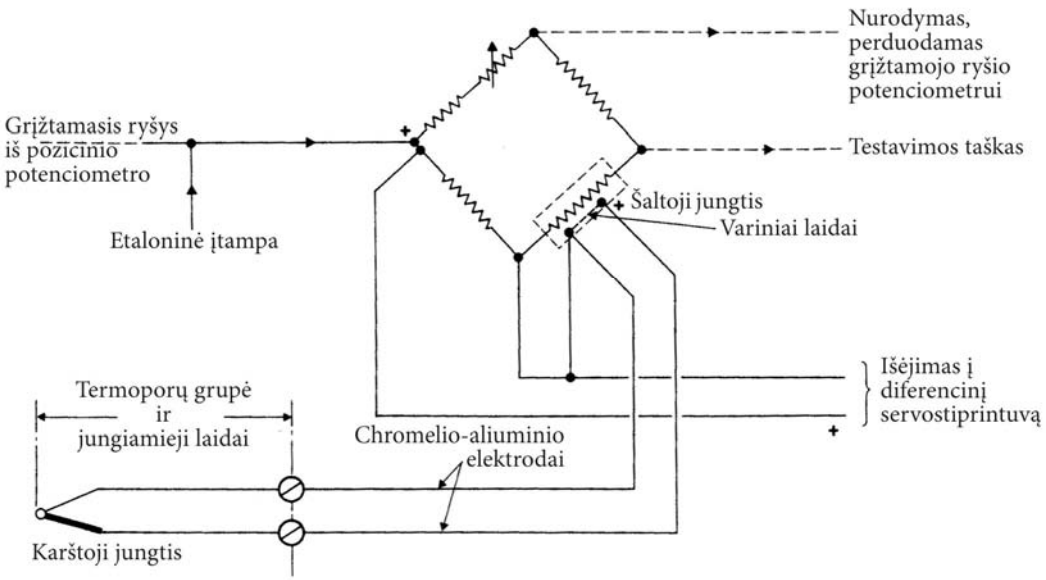
Terminė EVJ tiltelyje, sudarytame iš rezistorių R1–R12, sulyginama su potenciometro *R9* šliaužiklio atramine įtampa U_{at5} (3.1.18 pav.).



3.1.16 pav. Terminės EVJ matavimo kompensaciniu būdu realizacijos schema



3.1.17 pav. Stebulės pavidalo TE daviklis



3.1.18 pav. Šaltosios jungties kompensacijos principinė schema

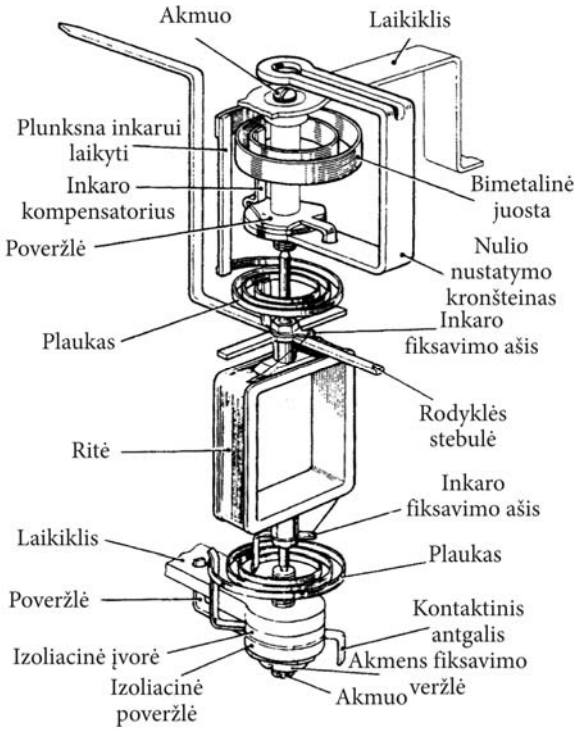
Pagal tiltelio įstrižainę įjungtas keitiklis (įtampa – šliaužiklio posūkis), kuris per stiprintuvą *A* valdo variklį *M,* balansuojantį tiltelį. Matuojant temperatūrą išbalansavus tiltelį, potenciometro *R9* šliaužiklio padėtis atitinka termometro skalės rodyklių, rodančių išmatuotą temperatūrą, padėtį. Ši matavimo schema taip pat gali būti taikoma signalizuoti apie fiksuotos temperatūros lygį. Prietaiso vaizduoklyje – du rodykliniai prietaisai, po vieną kiekvienam matavimo kanalui. Vienas prietaisas turi po dvi rodykles ir dvi skales, kaip ir minėtojo termometro. Didžiosios skalės žymos nuo 0 iki 1200 °C, padalos vertė – 100 °C, mažosios skalės žymos nuo 0 iki 100 °C, padalos vertė – 5 °C.

3.1.4. Termometrų paklaidos

Visiems nagrinėtiems termometrams būdinga ***metodinė*** dinaminė paklaida, pasireiškianti rodmenų vėlavimu. Ši paklaida priklauso nuo termometro laiko pastoviosios, kuriai įtakos turi daugelis veiksnių. Laiko pastoviajai sumažinti skysčių ir dujų termometrų keitikliuose įstatomos bronzinės pasidabruotos plokštelės, kietųjų kūnų termoelektriniuose termometruose (pirmoji grupė) termopora tvirtinama prie varinio žiedo, o išmetamųjų dujų srauto termometruose (trečioji grupė) mažinamas srauto stabdymo kamerų tūris. Nepaisant to, TE laiko pastovioji lieka pakankamai didelė: svyruoja nuo 2 iki 3 sek.

Elektrinių varžinių termometrų rodmenų papildoma metodinė paklaida atsiranda todėl, kad TE papildomai šyla nuo pro jį matavimo metu pratekančios srovės. Paklaidos kitimui įtakos turi ir maitinimo įtampos nepastovumas.

Termoelektrinių termometrų papildoma metodinė paklaida atsiranda dėl ***šaltosios jungties temperatūros kitimo***, parazitinės terminės EVJ atsiradimo ten, kur sujungiami laidai iš skirtingų medžiagų, o išmetamųjų dujų termometruose – ir dėl nevisiško dujų srauto sustabdymo. Termoporų šaltosios jungties temperatūrų pokyčių įtakai sumažinti naudojami ***bimetaliniai*** temperatūros paklaidų korektoriai. Deformuodamiesi jie įtempia ir atleidžia milivoltmetro atotampos spyruokles (3.1.19 pav.).



3.1.19 pav. Šaltosios jungties temperatūros pokyčių bimetalinis kompensatorius

Be to, išmetamųjų dujų termometruose paklaidai sumažinti naudojamos termoporos su gradavimo elektrodais NiK-SA ir NiFe-SK, generuojančios parazitines termines EVJ tik tada, kai t° > (100–300) °C (labai viršija šaltosios jungties temperatūrą), arba statomi ***specialūs termokompensatoriai***.

Parazitinėms terminėms EVJ eliminuoti TE tarpusavyje ir su rodikliais sujungiami specialiais laidais. Šie laidai gali būti pagaminti iš tų pačių medžiagų kaip ir elektrodai arba iš tokių medžiagų, kurių termi-

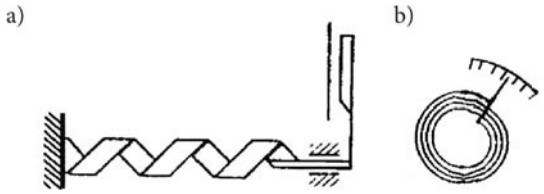
nės EVJ reikšmės jungčių su elektrodų medžiaga vietose yra nykstamai mažos arba baigtinės, bet priešingo ženklo.

Elektriniuose varžiniuose ir termoelektriniuose termometruose vadinamosios ***prietaiso*** paklaidos atsiranda dėl matavimo mechanizmų rėmelių varžų pokyčių, kintant temperatūrai. Šioms paklaidoms sumažinti termometrų schemose naudojami koreguojantieji termorezistoriai. Be to, termometrų ***rodmenų paklaidos*** atsiranda dėl laidų, jungiančių TE su matavimo schema, varžos pakitimų. Šioms paklaidoms sumažinti varžiniuose termometruose ir termoelektrinių termometrų šaltosios termoporos jungties temperatūros kompensavimo schemose elementai jungiami pagal trijų laidų schemą. Tada dviejų laidų, jungiančių termistorių su tiltelio schema, varžos jungiamos į dvejus gretimus tiltelio pečius, todėl varžų pokyčiai termometro rodmenims iš esmės neturi įtakos. Termoelektrinių pirmosios ir antrosios grupių termometrų ši paklaida nekompensuojama. Siekiant ją sumažinti, reikia sekti, kad išorinės grandinės varža atitiktų ant prietaisų ciferblato nurodomą rodiklio varžą.

Termometrų, kuriuose taikomas kompensacinis terminės EVJ matavimo būdas (3.1.16 pav.), jungiamųjų laidų varžos iš esmės neturi įtakos matavimų rezultatams. Tačiau reikia sekti, kad tokiuose termometruose nebūtų pažeistas laidų ekranavimas nuo išorinių elektromagnetinių laukų.

3.1.5. Bimetaliniai termometrai

Bimetalinių termometrų veikimo principas pagrįstas tuo, kad taikomas dviejų skirtingų medžiagų tiesinio šiluminio plėtimosi koeficiento skirtumas. Bimetalinio termometro temperatūrai jautrūs elementai gaminami iš plieno ($\alpha_1 = 19 \cdot 10^{-6}\ K^{-1}$) ir invaro ($\alpha_2 = 1 \cdot 10^{-6}\ K^{-1}$) bimetalinių plokštelių, susuktų sraigto (a) arba spiralės (b) pavidalu (3.1.20 pav.).



3.1.20 pav. Bimetalinių termometrų jautrieji elementai:
a – apvijų plokštelė; b – spiralė

Vienas plokštelės galas tvirtinamas prie prietaiso korpuso, o kitas – judantysis, sujungiamas su rodmenų atskaitos įrenginio rodykle arba posūkio keitikliu į elektrinį signalą. Temperatūrai kintant, plokštelės posūkio kampas kis atitinkamai matuojamai temperatūrai.

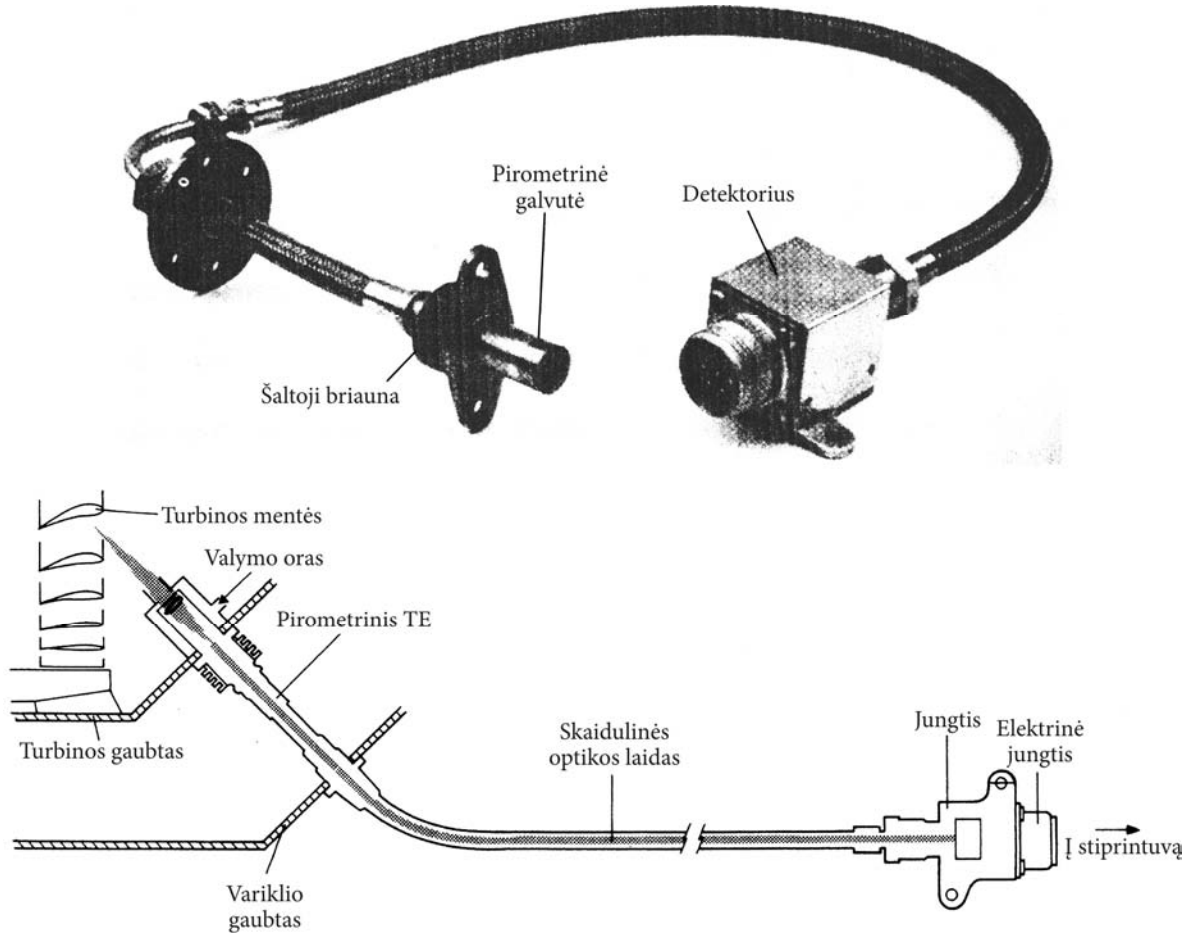
Bimetaliniai termometrai aviacijoje naudojami oro temperatūrai matuoti įgulos kabinoje, išorinio oro temperatūrai matuoti už sraigtasparnių borto arba atlieka daviklių funkcijas temperatūros reguliavimo sistemose. Bimetaliniais termometrais matuojamos temperatūros svyruoja nuo –60 °C iki +70 °C. Prietaisų minėtųjų temperatūrų skalės sugraduotos kas 10 °C, padalos vertė – 2 °C.

Bimetalinių termometrų paklaidos – ±(1–3) °C. Šių termometrų privalumas – konstrukcijos paprastumas ir patikimumas, trūkumas – didelis inertiškumas (iki 6 min.).

3.1.6. Pirometrinės temperatūros matavimo sistemos

Kaip žinoma, įkaitę kūnai skleidžia infraraudonojo diapazono elektromagnetines bangas, kurių intensyvumas proporcingas kūno temperatūrai. Taigi, registruojant šio spinduliavimo intensyvumą, galima nustatyti kūnų temperatūrą. Toks temperatūros matavimo principas nereikalauja būtino mechaninio kontakto su objektu, kurio temperatūra yra matuojama. Tai ypač svarbu, kai reikia matuoti judančių objektų temperatūrą, pavyzdžiui, aviacinių variklių turbinų mentelių temperatūrą.

Veikiančios pagal tokį principą temperatūros matavimo priemonės vadinamos spindulinės pirometrijos sistemomis. Į tokių sistemų sudėtį įeina kūnu skleidžiamo spinduliavimo ėmiklis, jungiamasis optinis kabelis ir spinduliavimo intensyvumo detektorius. Detektoriaus išėjime gaunama elektrinė įtampa, proporcinga matuojamai temperatūrai, gali būti stiprinama ir matuojama milivoltmetru 3.1.21 pav.



3.1.21 pav. Spindulinio pirometro sistema

Spindulinio pirometro stebimas įkaitusių turbinos mentelių spinduliavimas sustiprintas pirometrinio TE safyro linze, įtvirtinta titano apvade, turinčiame mažą, panašų į linzės, šiluminio plėtimosi koeficientą. Toliau spinduliavimas perduodamas į detektorių skaidulinės optikos šviesolaidžiu, kuris specialia jungtimi sujungtas su spinduliavimo detektoriumi. Pirometro korpusas gaminamas iš nerūdijančio plieno ir turi išorinį termoizoliacinį sluoksnį. Skaidulinės optikos šviesolaidis įdėtas į polimerinį lankstų apvalkalą, kuris apsaugo šviesolaidį nuo išorinio poveikio įtakos, perduodant optinį signalą į detektorių. Priekinė pirometro dalis įdėta į variklio turbinų skyrių, turi dvigubą aukštai temperatūrai atsparų korpusą.

Keičiamas į elektrinį optinis signalas veikia silicio fotoelementą, esantį aliuminio konteineryje, detektoriaus mazge. Konteinerio viduje termostatu palaikoma šiek tiek aukštesnė nei aplinkos temperatūra, kad elemento charakteristikos būtų stabilios ir tikslios, kintant išorinės aplinkos temperatūrai plačiu diapazonu.

Gaunamas detektoriaus išėjime silpnas ir netiesinis signalas perduodamas į stiprintuvą, kuris jį linearizuoja ir sustiprina iki lygio, reikiamo tiekti į temperatūros matavimo rodiklį ar variklio valdymo sistemą.

3.2. Manometrai

3.2.1. Paskirtis ir klasifikavimas

Prietaisai, skirti slėgiui arba slėgių skirtumui matuoti, vadinami ***manometrais***. Slėgis – tai dujinių arba skystųjų medžiagų būklės charakteristika. Slėgio matas – tolygiai paskirstytos ir statmenai paviršiaus ploto vienetą veikiančios jėgos ir to ploto vieneto santykis. Slėgio mato vienetas – paskalis (Pa):

$$1\ \text{Pa} = \frac{1\ \text{N}}{\text{m}^2},$$

čia N – Niutonas, jėgos vienetas.

Prisiminkime, kad: $(H_2O)\,1\ \text{kg}\cdot\text{s/cm}^2 = 735{,}56$ mm gyv. st. (kai 0 °C) = 10^4 mm vand. st. = 98 066,5 Pa ≈ 100 000 Pa = 0,1 MPa (0,1 megapaskalių).

Aviacijoje manometrais matuojami oro, dujų, kuro ir alyvos slėgiai hermetizuotoje kabinoje, varikliuose ir kituose agregatuose, pavyzdžiui, hidraulinėse stabdžių, variklių paleidimo, važiuoklės išleidimo sistemose ir pan.

Pagal slėgio matavimo būdą manometrai skirstomi į tris pagrindines grupes: mechaninius, elektromechaninius ir elektrinius.

Mechaniniai manometrai būna šių rūšių:

– deformaciniai manometrai – kuriuose matuojamas slėgis nustatomas pagal mechaninei įtampai jautraus elemento (JE) deformacijas arba to elemento išvystomą jėgą;
– skysčio-deformaciniai manometrai – kuriuose slėgis ar slėgių skirtumas palyginamas su skysčio stulpelio svoriu. Šie manometrai skirti matuoti nedideliems slėgiams, iki $2\cdot10^5$ Pa. Jie paprasti ir patogūs, bet tinka naudoti tik laboratorinėmis sąlygomis. Šie manometrai yra paplitę kaip prietaisai, skirti kitiems manometrams kalibruoti;
– svorio-cilindriniai manometrai – kuriuose naudojamas stūmoklio svoris. Tinka slėgiui nuo dešimtųjų dalių iki tūkstančių MPa matuoti, tačiau irgi tik laboratorinėmis sąlygomis.

Aviacijoje vyrauja deformaciniai manometrai su slėgiui jautriais elementais: membrana, membranine dėžute, silfonu, vamzdeline spyruokle (žr. 1.31 poskyrį).

Elektromechaniniai manometrai – tokie, kuriuose jautraus elemento (JE) deformacija arba išvystoma jėga yra keičiama keitikliu į tam proporcingą elektrinį signalą. Tokie manometrai plačiai naudojami aviacijoje, kadangi patogu turėti elektrinį slėgio variantą signalo pavidalu. Elektromechaniniai manometrai realizuojami kaip ***tiesioginio veikimo*** ir su ***jėgos kompensavimu*** prietaisai. Tiesioginio veikimo schemose naudojami magnetostrikciniai, pjezoelektriniai, puslaidininkiniai ir grafitiniai keitikliai. Schemose su jėgos kompensacija JE išvystoma jėga subalansuojama specialiu įtaisu. Subalansavus nuskaitomi šio įtaiso rodmenys.

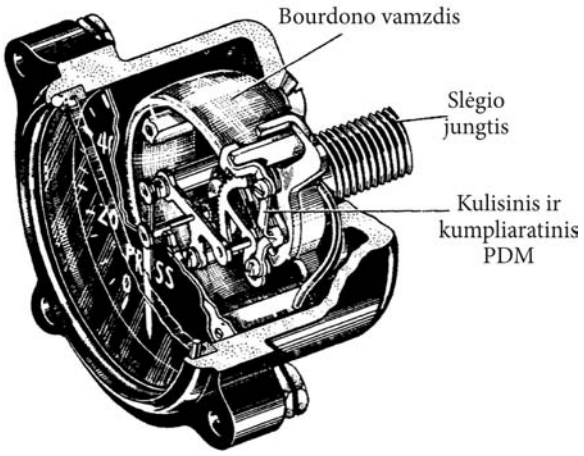
Deformaciniai ir elektromechaniniai manometrai matuoja slėgį intervale nuo keleto Pa iki dešimčių MPa.

Elektrinių manometrų veikimas grindžiamas medžiagų ir elementų fizinių savybių priklausomybe nuo slėgio. Tokiomis fizinėmis savybėmis gali būti: laidininko varžos kitimas priklausomai nuo aplinkos slėgio, jonizavimo srovės dydžio priklausomybė nuo slėgio, dujų temperatūros priklausomybė nuo jas veikiančio slėgio ir elektrinės iškrovos inertinėse dujose priklausomybė nuo slėgio. Tada manometrai vadinami varžos, jonizavimo, šiluminiais arba dujiniais.

Aviacijoje labiausiai paplitę mechaniniai-deformaciniai ir elektromechaniniai manometrai.

3.2.2. Deformaciniai manometrai

Tokie manometrai dar vadinami *tiesioginio nuskaitymo* prietaisais, kadangi slėgio manometras ir rodiklis sudaro vientisą mazgą. Jie išimtinai realizuojami Bourdono vamzdžio (vamzdelinės spyruoklės) pagrindu ir naudojami orlaivio hidraulinės sistemos slėgio matavimams bei stūmoklinių aviacinių variklių bendrajam galingumo lygiui nustatyti. Tokio manometro konstrukcijos pavyzdys pateiktas 3.2.1 pav.



3.2.1 pav. Tiesioginio nuskaitymo manometras

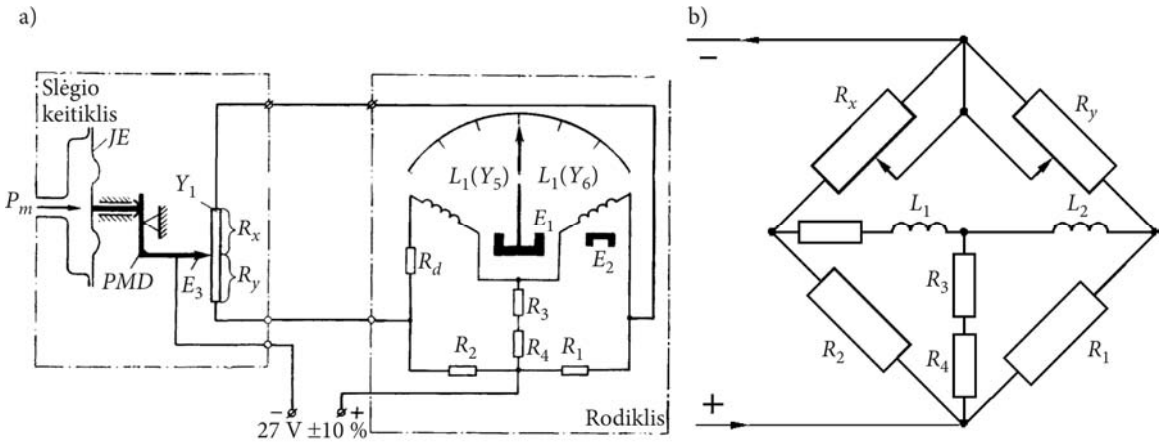
Deformacinių manometrų pagrindinis *trūkumas* yra tas, kad jie turi būti montuojami ten, kur reikia matuoti slėgį. Kitu atveju tenka naudoti slėgio kanalizacijos vamzdynus, o tai susiję su didelėmis problemomis, dinaminių matavimų vėlavimu, hermetizavimu ir pan.

3.2.3. Elektromechaniniai manometrai

Elektromechaniniai manometrai šio trūkumo neturi. Jų elektrinis slėgio daviklis su JE statomas kontroliuojamoje vietoje. Elektriniai slėgio davikliai turi įprastus deformacinių manometrų JE o skiriasi tuo, kad čia kampinis perdavimo–dauginimo mechanizmo poslinkis keičiamas į elektrinės grandinės elementų arba jos charakteristikų pokytį (*R, L, C, I* ir pan.). ***Elektrinis signalas***, proporcingas matuojamam slėgiui, perduodamas laidais ir vėliau keičiamas į pavidalą, patogų vizualiai atvaizduoti, arba toliau apdorojamas.

Manometrai su potenciometriniu slėgio keitikliu. Šie manometrai naudojami aviacinių variklių kuro ir alyvos slėgiams matuoti, diapazone nuo 0 iki 15 MPa.

Elektromechaninio manometro su mechaniniu PDM principinė schema pateikta (3.2.2 pav., a). Matuojamas slėgis P_m tiekiamas į JE vidų. Matuojant slėgius iki 300 kPa, JE naudojama membraninė dėžutė; iki 10 MPa – membrana; iki 15 MPa – vamzdinė spyruoklė.



3.2.2 pav. Manometro su potenciometriniu slėgio keitikliu: a – elektrinė schema; b – Andersono tiltelis

Proporcingas slėgiui JE poslinkis mechaniškai perteikiamas potenciometro V_1 šliaužikliui E_3, todėl kintant įėjimo slėgiui P_m, proporcingai keičiasi ir potenciometro dalinės varžos R_x bei R_y. Kad sumažėtų matavimų temperatūros priklausomybė, potenciometro apvija gaminama iš ***konstantano*** vielos.

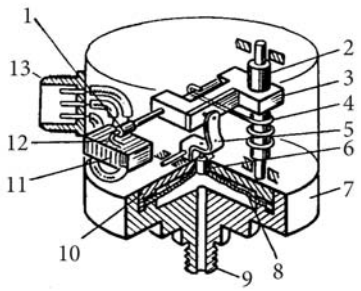
Varžos R_x ir R_y sudaro du Andersono tiltelio pečiai 3.2.2 pav., b. Kitus du pečius sudaro rezistoriai R_1 ir R_2. Santykio matuoklio ritės L_1 ir L_2 (kurių varžos R_5 ir R_6) kartu su rezistoriumi R_d sudaro pagrindinę tiltelio įstrižainę. Bendruoju ričių sujungimo tašku per varžas R_3 ir R_4 sudaroma pusinė tiltelio įstrižainė. Santykio matuoklio ritės turi vienodą vijų skaičių, bet skirtingas varžas, kadangi skirtingi ričių matmenys. Ritės tvirtinamos kampu viena kitos atžvilgiu, kuris lygus 120°. Varža R_d papildo ritės L_1 varžą R_5 iki dydžio, lygaus antrosios ritės varžai R_6. Varžos R_3 *ir* R_4, pagamintos atitinkamai iš vario ir konstantano, skirtos temperatūrinėms paklaidoms dėl ričių varžų dydžių kitimo, kintant temperatūrai, sumažinti. Siekiant parinkti reikiamą temperatūrinį varžos koeficientą, naudojami du nuosekliai sujungti vieliniai rezistoriai. Kai $R_x = R_y$, tiltelis užima pusiausvyros būseną. Srovė, tekanti per pusinę diagonalę (varžos R_3 ir R_4), išsišakoja į dvi lygias, bet priešingų krypčių sroves, tekančias ritėse L_1 ir L_2. Ritėse indukuojasi du vienodi pagal dydį magnetiniai srautai, nukreipti 120° kampu vienas kito atžvilgiu. Ritėse indukuojamo sumarinio magnetinio srauto kryptį rodo pasisukantis išilgai magnetinio srauto pastovusis magnetas E_1 su rodykle viduryje. Šiuo atveju rodyklė rodo skalės vidurį, t. y. pusę maksimaliai matuojamo slėgio.

Kintant slėgiui, kinta ir srovės ritėse. Priklausomai nuo to, ar slėgis P_m didėja, ar mažėja pirminės ribos atžvilgiu, rodyklės atsilenkimo kampas φ didėja arba mažėja. Nejudamasis magnetas E_2 reikalingas, kad rodyklė, nuėmus slėgį, grįžtų į nulinę padėtį.

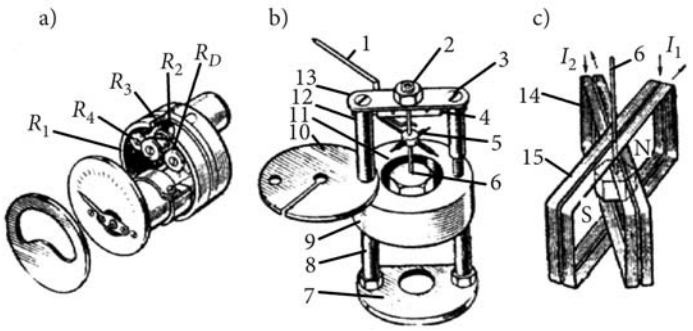
Manometras sudarytas iš dviejų konstrukcinių mazgų: potenciometrinio slėgio keitiklio ir atvaizdavimo įtaiso – rodiklio. Potenciometrinio slėgio keitiklio konstrukcija (3.2.3 pav.) sudaryta iš stūmiklio *6*, sūpuoklės *5*, sverto *3* su ašimi *2* ir šliaužiklio *12* su laikikliu *1*. Manometro rodiklio konstrukcinė schema, į kurią įeina magnetoelektrinis santykio matuoklis su judamuoju magnetu ir varžos R_1, R_2, R_3, R_4 ir R_d, parodyta 3.2.4 pav., a, o konstrukcinė santykio matuoklio schema pateikta 3.2.4 pav., b, c. Dvi nejudamosios stačiakampės vielinės ritės (rėmeliai) *14* ir *15* (kiekviena sudaryta iš dviejų puselių, kad palengvintų rodyklės *1* tvirtinimą prie ašies *6*) išdėstytos taip, kad sudarytų 120° tarpusavio kampą.

Parazitiniams virpesiams nenusistovėjusiame režime nuslopinti judamasis pastovusis magnetas *11*, kuris yra tarp ričių rėmų ant ašies *6*, tvirtinamas varinio slopintuvo *9* viduje. Santykio matuoklio ašis turi iš abiejų pusių kūginius paviršius (kernas) ir tvirtinama tarp dviejų plokštumų korundo pakulnėse (viršuje sraigte *2* ir apačioje slopintuvo *9* dugne). Slopintuvas *9* su dangteliu *10* tvirtinamas ričių viduryje. Judamoji sistema balansuojama pasvarais *5*. Nuo išorinių elektromagnetinių laukų įtakos apsaugo metalinis ekranas. Kad elektrinė schema būtų simetriška, R_1 ir R_2 turi būti lygūs. Nuliui nustatyti potenciometrinio keitiklio mechanizme numatomas reguliavimo sraigtas, leidžiantis derinti šliaužiklio padėtį (slėgio turi nebūti). Rodiklio privalumas – maži matmenys, o trūkumas – matavimų skalės mojus tik 120°.

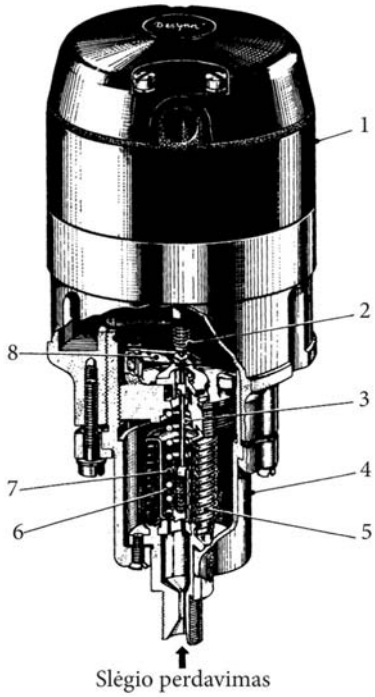
Siekiant praplėsti santykio matuoklio rodiklio matavimo skalės mojų iki 270°, naudojama nagrinėtojo principo modifikacija, kai slėgio keitiklyje tiesinis potenciometras, taikant žiedinę schemą, užtrumpinamas keturiomis srovės atšakomis, (dalijančiomis potenciometrą į keturias lygias dalis), sujungtomis su keturiomis rodiklio ritėmis. Šio rodiklio konstrukcija ir veikimo principas analogiškas. Jo trūkumas: daugiau laidų informacijos perdavimo linijoje. Tokio tipo slėgio daviklis pateiktas 3.2.5 pav.



3.2.3 pav. Potenciometrinio slėgio keitiklio kinetinė schema:
1 – šliaužiklio laikiklis; 2 – ašis; 3 – svertas; 4 – grąžinimo spyruoklė;
5 – sūpuoklės; 6 – stūmiklis; 7 – pagrindas; 8 – gofruotoji membrana;
9 – atvamzdis; 10 – dangtelis; 11 – potenciometras; 12 – šliaužiklis;
13 – kištukinė jungtis



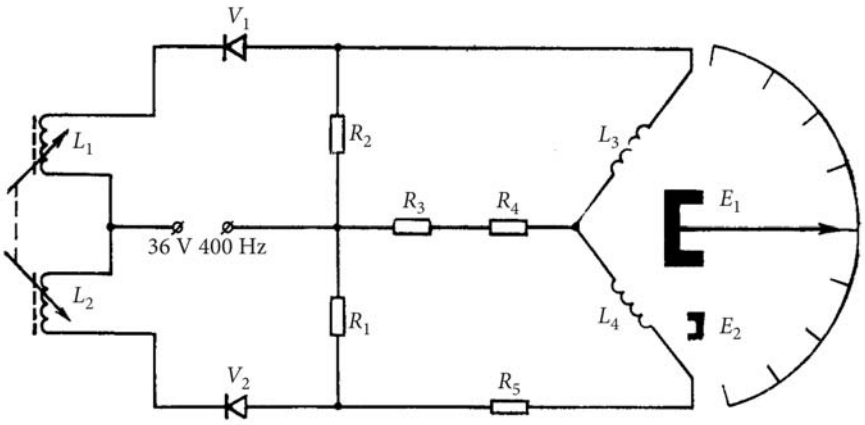
3.2.4 pav. Konstrukcinė manometro rodiklio schema:
a – rodiklis; b, c – santykio matuoklio konstrukcinė schema; 1 – rodyklė;
2 – varžtas su korundo pakulne; 3 – varžtas; 4 – nejudamasis ir pastovusis magnetas;
5 – pasvarai; 6 – ašis; 7 – plokštė; 8, 12 – stovai; 9 – varinio slopintuvo korpusas; 10 – dangtelis;
11 – judamasis pastovusis magnetas; 13 – tiltelis; 14 – vidinė ritė; 15 – išorinė ritė



3.2.5 pav. Manometro daviklis su žiediniu reostatiniu keitikliu: 1 – slėgio keitiklis; 2 – ekscentrinė ašis;
3 – stūmimo strypas; 4 – slėgio daviklis; 5 – sifonas; 6 – poslinkio perdavimo mechanizmas;
7 – spyruoklė; 8 – svertas

Manometrai su indukciniu slėgio keitikliu. Šie manometrai neturi mechaninių slėgio perdavimo elementų ir trintį sukeliančių keitiklių. Juose JE mechaninis poslinkis į elektrinį signalą kečiamas ***diferenciniu indukciniu*** slėgio keitikliu. Atsižvelgiant į matuojamojo slėgio dydį, JE naudojamos membranos arba membraninės dėžutės, o rodikliais – magnetoelektriniai dviejų ričių santykio matuokliai su judančiu kampu pastoviuoju magnetu (konstrukciją žr. 3.2.4 pav.) ir feromagnetiniai santykio matuokliai. Matuojant slėgį (3.2.6 pav.), deformuojasi JE, pasislenka paslankusis inkaras, sukeliantis diferencinio indukcinio keitiklio (sudaryto iš dviejų ričių) magnetinėje grandinėje oro tarpų pokytį. Pasikeitus inkaro padėčiai bendroje ričių magnetinėje grandinėje, keičiasi ričių L_1 ir L_2 induktyvumai. Šios ritės sudaro du tiltelio pavidalo matavimo schemos pečius, kitus du pečius sudaro rezistoriai R_1 ir R_2.

Kadangi santykio matuoklis maitinamas pastoviąja, o indukcinės ritės kintamąja srove, į schemą įjungti du diodai V_1 ir V_2, išlyginantys kintamąją srovę. Pakitus ričių L_1 ir L_2 induktyvumams, kinta srovės ir santykio matuoklio ritėse L_3 ir L_4, dėl to judančiojo magneto E_1 rodyklė nusistoja pagal santykio matuoklio ričių ekvivalentinio magnetinio srauto vektoriaus kryptį.



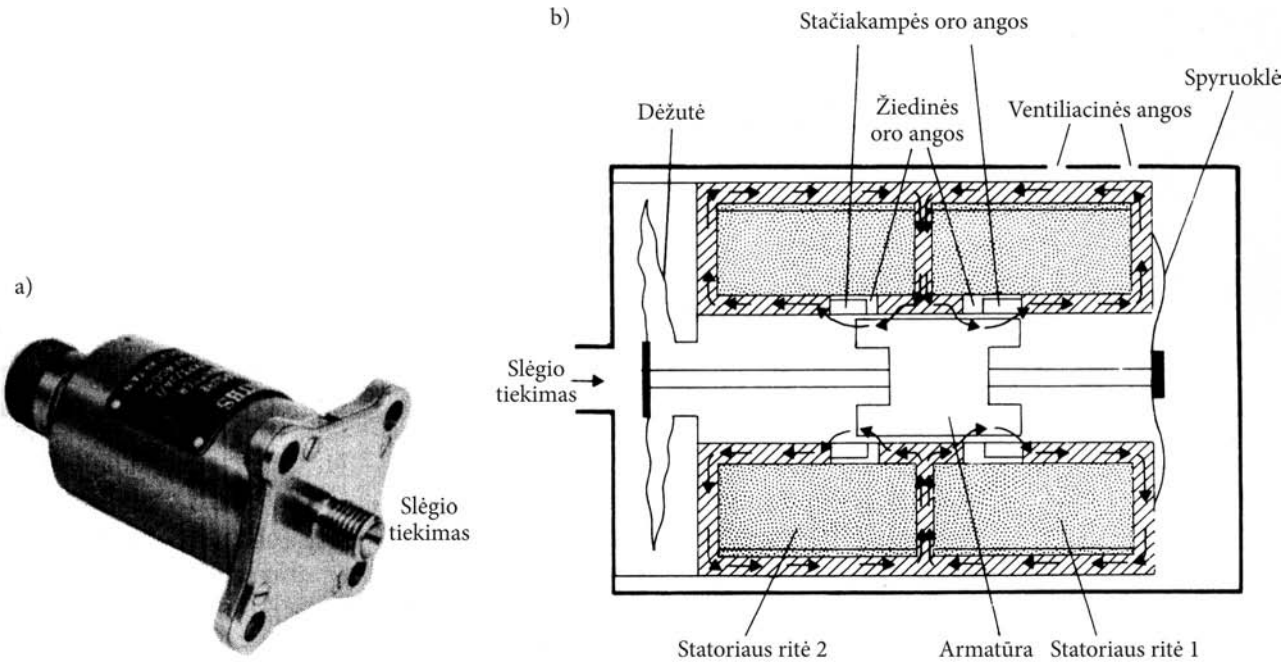
3.2.6 pav. Elektromechaninio manometro su indukciniu slėgio keitikliu elektrinė schema

3.2.7 pav. pateiktas diferencinio indukcinio slėgio keitiklio bendrasis vaizdas (3.2.7 pav., a) ir jo principinė schema (3.2.7 pav., b).

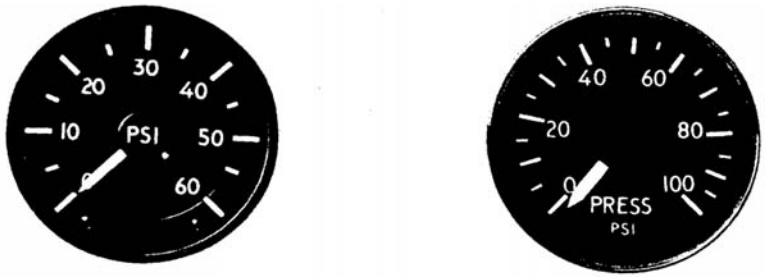
Slėgiui veikiant membraninę dėžutę, judamasis inkaras keičia savo padėtį žiedinių angų atžvilgiu, o jo armatūra persislinkdama atitinkamai keičia statoriaus ričių oro tarpelių dydį. Pavyzdžiui, oro tarpelio, susieto su statoriaus rite *1*, ilgis mažėja, o susieto su rite *2* – didėja. Kadangi magnetinė varža magnetinėje ir elektrinėje ritėse yra proporcinga efektyvaus oro tarpelio ilgiui, keisis jose tekančios srovės, valdančios matavimų rodiklį, ričių indukcija (3.2.8 pav.).

Diferencinio indukcinio slėgio keitiklio konstrukcinė schema pateikta 3.2.9 pav. Manometro JE apsaugoti nuo suirimo, esant didelėms inercinėms perkrovoms, jo konstrukcijoje numatyta apsaugos membraninė spyruoklė *7* su reguliuojamąja atrama *12*.

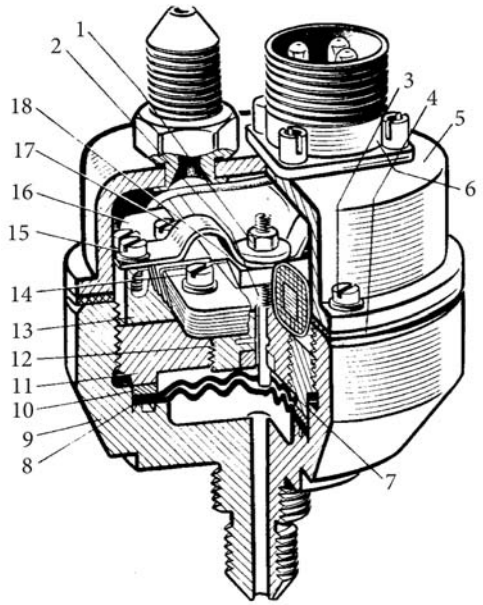
Šio tipo manometrai matuoja slėgį iki 30 MPa su pulsacijomis iki 700 Hz, paklaidos ≤4 %. Skalės mojus 120°.



3.2.7 pav. Diferencinis indukcinis slėgio keitiklis:
a – bendrasis vaizdas; b – principinė schema



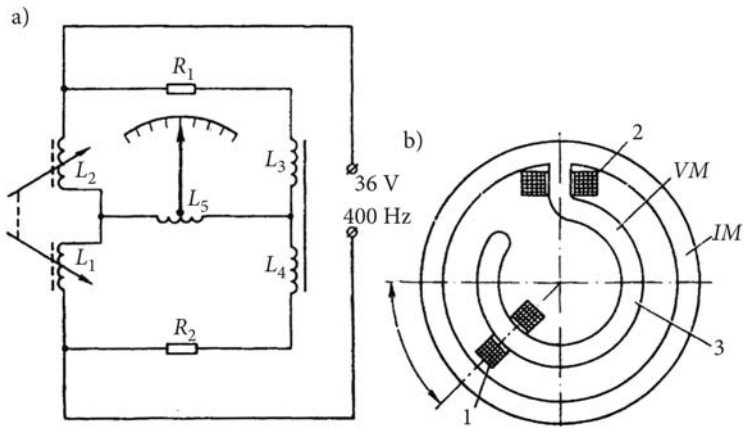
3.2.8 pav. Slėgio matavimų rodiklių pavyzdžiai



3.2.9 pav. Indukcinio slėgio keitiklio konstrukcinė schema:1 – veržlė; 2 – štokas; 3, 14, 15 – varžtai; 4 – tarpinė; 5 – dangtis; 6 – kištukinė jungtis; 7 – apsaugos membrana; 8 – JE; 9 – korpusas; 10 – sandarinimo žiedas; 11 – dangtelis; 12 – reguliuojamoji atrama; 13 – plokštė; 16 – ritė su šerdimi; 17 – spyruoklė; 18 – judamasis inkaras

Indukciniai manometrai su ferodinaminiu santykio matuokliu. Šie manometrai turi analogišką be trinties porų diferencinį indukcinį slėgio keitiklį, o kaip rodiklis naudojamas *ferodinaminis* santykio matuoklis.

Tokio manometro tiltelinė matavimo schema (3.2.10 pav., a) sudaroma iš dviejų keitiklio induktyvumo ričių L_1 ir L_2 bei santykio matuoklio nejudamosios ritės *1* dviejų pusių L_3 ir L_4. Paslankioji ritė L_5 yra tiltelio įstrižainėje ir gaubia vidinį magnetolaidį *VM* (3.2.10 pav., b).



3.2.10 pav. Indukcinio manometro su ferodinaminiu santykio matuokliu (b) principinė elektrinė schema (a)

Ši ritė turi galimybę keisti kampinę padėtį tarp vidinio *VM* ir išorinio *IM* santykio matuoklio magnetolaidžių.

Atsiradus srovei tiltelio grandinėje, susidaro sukimo momentas M_{suk}, kurio dydis priklauso nuo srovių, sužadintų ritėje *2* ir judamojoje ritėje *1* bei pastarosios pasisukimo kampo φ. Judamąją ritę *1* taip pat veikia priešingos krypties atoveiksmio sukimo momentas M_{pr}, atsirandantis dėl judamosios ritės *1* pastangų įtraukti į save geležinę šerdį *3*. Nusistovėjusi judamosios ritės *1* padėtis kampu φ atitinka lygybę $M_{suk} = M_{pz}$.

Dėl didesnio skalės mojaus, siekiančio 270° (3.2.8 pav.), šių manometrų ***paklaidos*** mažesnės negu kitų manometrų su indukciniais slėgio keitikliais ir sudaro apie ±3 %. Indukciniai slėgio keitikliai atskiriami vienas nuo kito ir kitų magnetinių medžiagų taip, kad būtų išvengta magnetinių laukų tarpusavio sąveikos. Maitinimo įtampos pokyčiai vienodai veikia momentus M_{suk} ir $M_{pr.}$ Praktiškai jie neturi įtakos prietaiso rodmenims.

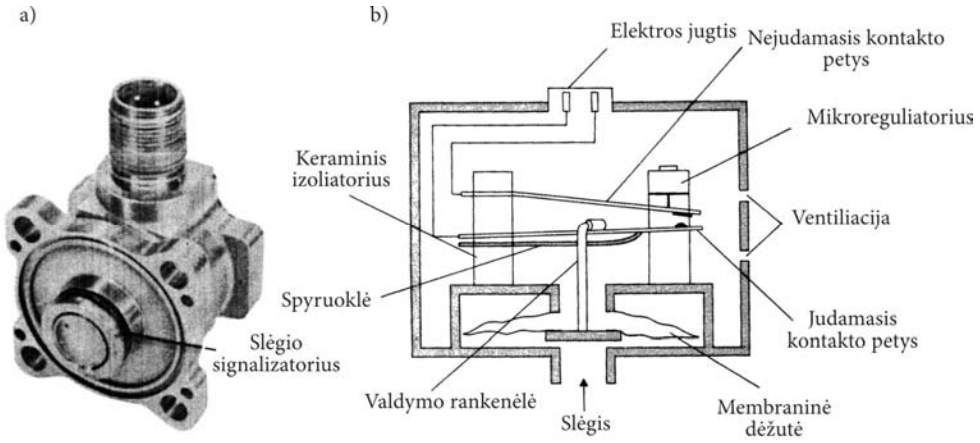
3.2.4. Slėgio signalizatoriai

Slėgio signalizatoriai naudojami signalams apie normalų arba kritinį slėgį oro ir hidraulinėse sistemose gauti. Signalizatoriuose jautrus slėgiui elementas valdo signalines elektrines grandines komutuojančius kontaktus.

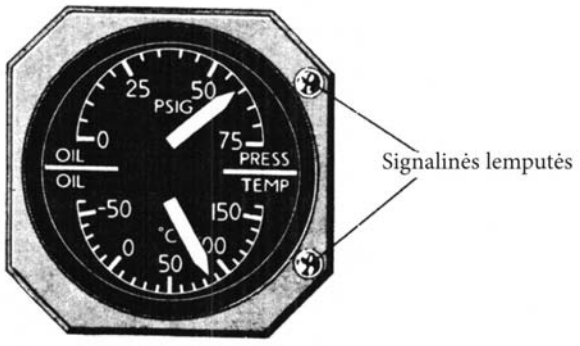
3.2.11 pav. pateikta schema slėgio signalizatoriaus, suveikiančio neleistinai sumažėjus slėgių skirtumui $P_d = P_1 - P_2$. Slėgio lygis, kuriam esant prietaisas suveikia, reguliuojamas mikroreguliatoriaus varžtu.

Slėgio signalizatorius apibūdina: slėgio ribos lygio keitimo diapazonas; statinės charakteristikos pavidalas; kontaktų išjungimo galingumas; atsparumas vibracijoms.

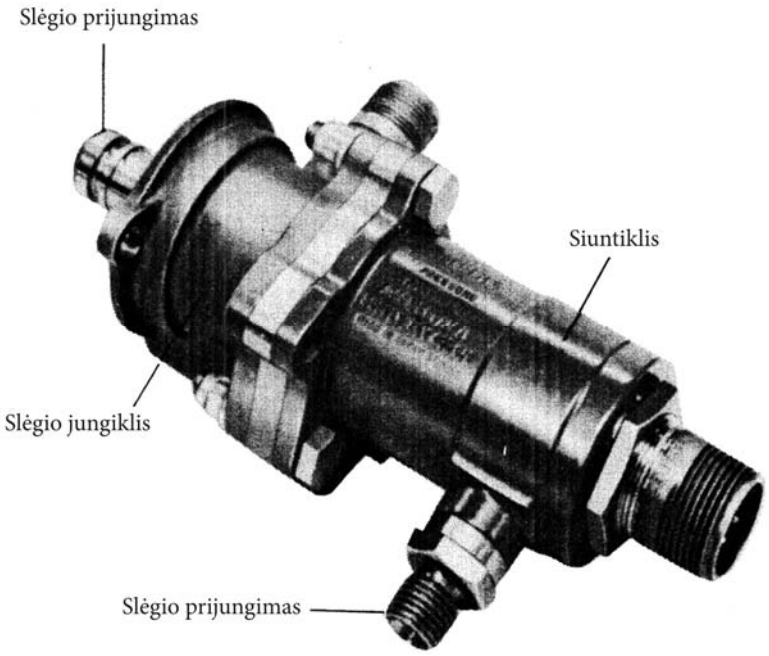
Prireikus slėgio daviklis, veikiantis su atitinkamo slėgio matavimų rodikliu (3.2.12 pav.), gali būti pritaikytas ir ribinio ar nustatyto slėgio signalizacijai (3.2.13 pav.).



3.2.11 pav. Slėgio signalizatorius: a – bendrasis vaizdas; b – principinė schema



3.2.12 pav. Variklio alyvos slėgio indikatorius-signalizatorius



3.2.13 pav. Mišrusis manometro slėgio daviklis-signalizatorius

3.2.5. Elektromechaninių manometrų paklaidos

Šių manometrų paklaidos susideda iš minėtųjų mechaninių manometrų paklaidų ir elektrinės prietaisų dalies paklaidų.

Prie manometrų metodinių paklaidų priskiriamos paklaidos, priklausančios nuo santykio matuoklio rezultatyvaus magnetinio srauto vektoriaus krypties pokyčio, atsirandančio veikiant pastoviam magnetui ir kintant maitinimo įtampai. Rezultatyvaus (suminio) santykio matuoklio magnetinio srauto vektoriaus ϕ_2 kryptis priklauso nuo nejudančiojo magneto magnetinio srauto vektoriaus ϕ_m ir santykio matuoklio ričių suminio srauto vektoriaus ϕ_k geometrinės sumos. Kintant maitinimo įtampai, keičiasi vektoriaus ϕ_k modulio dydis, o vektoriaus ϕ_m modulio dydis lieka pastovus. Tai sukelia papildomą vektoriaus ϕ_r posūkį kampu, proporcingu vektoriaus ϕ_k modulio kitimo dydžiui. Siekiant sumažinti šią paklaidą, pastovusis magnetas parenkamas su mažu srauto vektoriaus ϕ_m modulio dydžiu, pakankamu tik atlenkti prietaiso rodyklei į nulinę padėtį.

Manometruose su potenciometru, padalytu į 4 sekcijas, atsiranda papildoma paklaida dėl 270° matavimo kampo aproksimavimo tiesėmis kas 90°. Ši paklaida eliminuojama, kalibruojant manometro skalę. Prie prietaiso paklaidų, kurias sukelia mechaniniai manometrų elementai, prisideda paklaidos, kylančios dėl trinties potenciometriniame keitiklyje ir rodiklio atramose.

Elektrinėje manometro dalyje matavimo paklaidos gali atsirasti dėl nenumatytos elektromagnetinių laukų sąveikos ir temperatūros pokyčių, veikiančių elektrinės schemos elementus. Temperatūrinės paklaidos koreguojamos termokompensatoriais.

3.3. Tachometrai

3.3.1. Paskirtis ir klasifikavimas

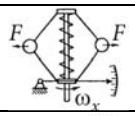
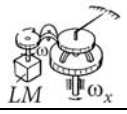
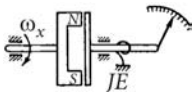
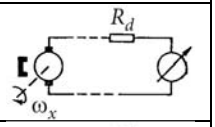
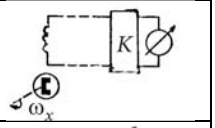
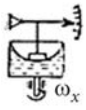
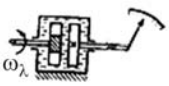
Svarbūs aviacinių variklių parametrai yra veleno, kompresoriaus ir turbinos sukimosi dažniai. Šie parametrai apibūdina ne tik variklio techninį, bet ir darbo režimą, nuo kurio priklauso variklio galingumas. Todėl apsisukimų (sūkių) dažnio reikšmė turi būti matuojama pakankamai dideliu tikslumu (0,5–1,0) %.

Sūkių dažnio matavimo prietaisai vadinami ***tachometrais***. Veleno sukimosi judesys gali būti apibūdintas sūkių dažniu n ir kampiniu sukimosi greičiu ω. Sūkių dažnio vienetas – apsisukimas per sekundę.

SI sistemoje abiejų dydžių matai yra sekundė minus pirmuoju laipsniu $\left(s^{-1}\right)$. Sūkių dažnio ir kampinio greičio sąsają nusako išraiška $\omega = 2\pi n,$ arba, jei *n* išreiškiamas apsisukimais per minutę: $\omega = \frac{\pi}{30} \cdot n.$

Sūkių dažnį galima matuoti absoliučiuoju metodu, kai veleno apsisukimų skaičius nustatomas per nustatytą laiko intervalą ir netiesiogiai, naudojant įvairių tipų keitiklius. 3.2 lentelėje pateikiama tachometrų klasifikacija, nurodant jų veikimo principą ir realizavimo schemas.

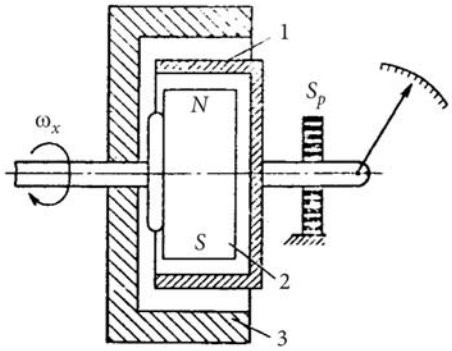
3.2 lentelė. Sūkių dažnio matavimo metodai

Tachometro tipas	Veikimo principas	Principinė schema
Išcentrinis	Išcentrinės jėgos *F*, atsirandančios kūnui sukantis, priklausomybės nuo kampinio greičio ω_x panaudojimas	
Laikrodinis	Objekto sūkių skaičiaus per pasirinktą laiką nustatymas laikrodiniu mechanizmu	
Rezonansinis	Etaloninio rezonatoriaus savųjų virpesių, atitinkančių žinomąjį kampinį greitį, sutapimas su priverstinių tiriamojo objekto sukeliamų virpesių dažniu	
Stroboskopinis	Stroboskopinio efekto, apšviečiant objektą impulsais, taikymas. Vaizdas stabilizuojasi, kai dažniai kartotiniai	
Magnetoindukcinis	Magnetinio lauko, sukamo greičiu, proporcingu matuojamam kampiniam greičiui, sąveika su JE indukuotu sūkurinių srovių lauku	
Pastoviosios srovės	Pastoviosios srovės generatoriaus išėjimo įtampos priklausomybė nuo inkaro, sujungto su objektu, sukimosi greičio	
Dažninis impulsinis	Kintamosios įtampos generatoriaus išėjimo įtampos priklausomybė nuo su objektu sujungto rotoriaus sukimosi greičio	
Plūdinis	Skysčio, besisukančio tiriamojo objekto greičiu, lygio priklausomybė nuo skysčio sukimosi greičio	
Frikcinis skystinis	Jėgos, kuria skystis traukia (įsuka) kietąjį kūną, priklausomybė nuo šio skysčio sukimosi greičio	

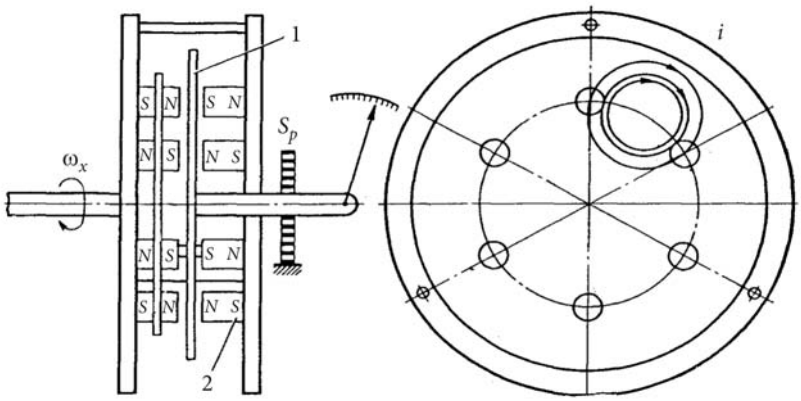
Dažniausiai paplitęs yra ***magnetoindukcinis*** sūkių dažnio nustatymo metodas. Jam būdingas paprastumas ir tiesinė statinė matavimo charakteristika.

3.3.2. Magnetoindukcinio tachometro realizavimo būdai

Magnetoindukciniai tachometrai sudaromi naudojant cilindrinį arba diskinį jautrųjį elementą (tachometrinį keitiklį). Pirmuoju atveju (3.3.1 pav.) – tai plonasienis elektrai laidus tuščiaviduris cilindras *1*, įtaisytas tarp besisukančio magneto *2* ir magnetolaidžio *3*. Antruoju atveju (3.3.2 pav.) – tai diskas *1* tarp sukamųjų cilindrinių magnetų *2*.



3.3.1 pav. Magnetoindukcinio tachometro su tuščiaviduriu cilindru kinetinė schema:
1 – cilindras; 2 – magnetas; 3 – magnetolaidis; S_p – spyruoklė



3.3.2 pav. Disko pavidalo magnetoindukcinis elementas:
1– cilindras; 2 – magnetas; S_p – spyruoklė

Tachometrų JE ir besisukančios magnetinės sistemos tvirtinamos ant atskirų ašių. Magnetinei sistemai sukantis ω dažniu, proporcingu variklio veleno sukimosi dažniui, dėl magnetinės indukcijos jautriojo elemento medžiagoje indukuojasi ***sūkurinės*** srovės, kurios savo ruožtu sukuria savąjį magnetinį lauką. JE ir nuolatinių magnetų magnetiniams laukams veikiant vienas kitą, atsiranda ***sukimo momentas***, JE ašis pasisuka.

Pasisukant JE ašiai, užsisuka su ja sujungta spyruoklė S_p ir sukelia pasipriešinimo momentą, atitinkantį ašies posūkio kampą.

Esant ***pastoviam*** magnetinės sistemos sukimosi dažniui ω, JE pasisuks tokio dydžio kampu, kuriam esant atoveikio momentas susilygins su sukamuoju jėgos momentu. Taigi tachometro JE ašis pasisuks kampu, atitinkančiu matuojamą sūkių dažnį.

Nustatysime tachometro su disko pavidalo JE (3.3.2 pav.) gradavimo statinę charakteristiką. Sukamąjį jėgos momentą M_S, atsirandantį matavimo mazge (diskas – magnetinė sistema), rasime iš formulės:

$$M_S = 1{,}54 \frac{B_\delta^2 d_m^3 \delta_d r_0 p}{\rho_d \sin \frac{|\pi|}{p}} n, \tag{3.8}$$

čia B_δ – magnetinė indukcija oro tarpe, T; d_m – cilindrinių magnetų skersmuo, m; δ_d – disko storis, m; r_0 – nuotolis tarp disko centro ir magnetų centrų, m; p – matavimo mazgo magnetų polių porų skaičius; ρ_d – santykinė disko medžiagos varža, Ωm.

(5.8) formulė tinka, jei atstumas tarp cilindrinių magnetų ašių yra 2,5–3 kartus didesnis už magnetų skersmenį. Sukamajam jėgos momentui M_S pasipriešina spyruoklės sukeliamas jėgos momentas:

$$M_{pr} = \frac{E b_S h_S^3}{12 L_S} \varphi , \tag{3.9}$$

čia E – spyruoklės medžiagos standumo modulis, Pa; b_S, h_S, L_S – atitinkamai spyruoklės plotis, storis ir ilgis, m; φ – spyruoklės susukimo kampas, radianais.

Esant tam tikrai kampo φ reikšmei, susidaro sistemos dinaminė pusiausvyra (jėgos momentų lygybė). Tada, lyginant (3.8) ir (3.9) lygčių dešiniąsias puses, galima gauti tachometro su diskiniu JE statinės charakteristikos lygtį:

$$\varphi = 18,48 \frac{B_\delta dm \delta dr_0 p L_s}{\rho_d E b_s h_s^3 \sin\frac{\pi}{p}} .n. \tag{3.10}$$

Analogiškai gali būti gauta ir tachometro su cilindriniu JE elementu (dangteliu) statinė charakteristika:

$$\varphi = 12 \frac{\left(B_\delta l D\right)^2 \delta p L_s N}{\rho_d E b_s h_s^3} n, \tag{3.11}$$

čia $N = \ln\left[1 + \frac{\pi b}{2(a+b)}\right]$ – pastovusis koeficientas, priklausantis nuo magneto polių geometrijos; l – cilindrinio magneto ašinis ilgis, m; D – dangtelio skersmuo, m; a – atstumas tarp gretimų magneto polių artimiausių kraštų, m; b – magneto poliaus plotis, m.

Kaip matyti iš (3.10) ir (3.11) išraiškų, abiejų tachometrų ***statinės*** matavimo charakteristikos $\varphi = f(n)$ yra tiesinės.

Magnetoindukcinio tachometro dinaminė charakteristika gaunama pagal judamosios tachometro dalies judesio diferencinę lygtį. Nevertinant dinaminių iškraipymų, kuriuos sukelia objekto sūkių nuotolinio perdavimo į tachometrą įtaisai, magnetoindukcinio tachometro ***dinaminė*** matavimų charakteristika bus:

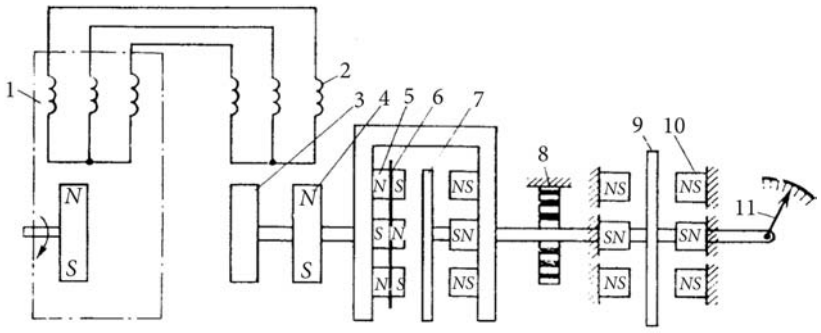
$$W(p) = \frac{K}{p^2 + 2d\omega_0 + W_0^2}, \tag{3.12}$$

čia $p = -j\omega t$ – kompleksinis kintamasis; $k = \frac{M_s}{I \times n}$ – koeficientas, priklausantis nuo magnetinės ir judamosios sistemos (JS) parametrų; J – JS inercijos momentas; $d = \frac{K_d}{2\sqrt{CJ}}$ – sistemos virpesių slopinimo koeficientas; K_d – JS savaiminio slopinimo koeficientas; C – priešinga kryptimi veikiančios spyruoklės standumas; ω_0 – JS savųjų virpesių dažnis.

Kai matavimo sistemos virpesių slopinimo laipsnis mažas ($d < 1$), tachometro dinaminė charakteristika yra virpamojo pobūdžio. Jei $d > 1$, charakteristika yra aperiodinė. Paprastai $d < 1$, todėl JS virpesiams slopinti naudojamas specialus slopintuvas, pavyzdžiui, magnetoindukcinis.

Tachometriniams davikliams (3.3.1, 3.3.2 pav.) jungti prie besisukančio variklio veleno naudojama nuotolinė sinchroninė pavara („elektrinis velenas“), sudaryta iš sinchroninio trifazio generatoriaus, ryšio linijos ir sinchroninio variklio (3.3.3 pav.).

Atliekant matavimus pagal tachometro su diskiniu JE schemą (3.3.3 pav.), įtampa, kurios dažnis proporcingas aviacinio variklio rotoriaus sūkiams, nuo generatoriaus *1* perduodama sinchroninio variklio statoriui *2* ir sužadina jame ***besisukantį magnetinį lauką.*** Šis laukas įmagnetina variklio histerezinius diskus *3* (pagamintus iš magnetinės medžiagos su didele koercityvine jėga). Įmagnetintų histerezinių diskų magnetinis laukas sukasi sinchroniškai su jį sukėlusiu statoriaus *2* magnetiniu lauku, tačiau dėl didelės histerezės diskų medžiagoje diskų magnetinio lauko poliai tam tikru kampu ***atsilieka*** nuo statoriaus lauko polių. Dėl to atsiranda sukimo momentas, sukantis sinchroninio variklio rotorių.



3.3.3 pav. Tachometro su diskiniu JE principinė schema

Kai sinchroninio variklio rotoriaus sūkių dažnis atitinka aviacinio variklio sūkių dažnį, veikiami statoriaus lauko magnetai *4* laipsniškai užsuka spyruoklę *8*. Šiuo atveju pagrindinis spyruoklės *8* užsukimo momentas priklauso nuo magnetų *4* ir besisukančio statoriaus lauko sąveikos, o histereziniai diskai *3* sukelia tik nedidelį papildomą sukimo momentą. Staigiai ***pakitus*** aviacinio variklio veleno sūkių dažniui, sinchroninis sūkių dažnio perteikimas tachometro judamajai sistemai gali sutrikti. Tokiu atveju ***histerezinių diskų poveikiu*** atkuriamas judamosios sistemos sinchroniškas sukimas aviacinio variklio rotoriaus atžvilgiu. Sinchroninio variklio rotorius suka matavimo mazgo magnetus *5,* turinčius termomagnetinį šuntą *6*. Dėl magnetų *5* ir disko *7* laukų sąveikos pastarasis pasisuka ir užsuka besipriešinančią spyruoklę *8*.

Matuojamojo sūkių ***dažnio reikšmė stebima*** pagal rodyklę *11*, pritvirtintą ant JE ašies. Ant tos pašios ašies pritvirtintas slopintuvo diskas *9*. Esant staigiems judamosios sistemos sukimosi dažnio svyravimams, slopintuvo diske vyksta sūkurinių srovių indukcija, kurių magnetinis laukas dėl sąveikos su magnetų *10* lauku ***slopina*** judamąją sistemą ir palengvina rodyklės rodmenų nuskaitymą.

3.3.3. Magnetoindukcinių tachometrų konstrukcijos

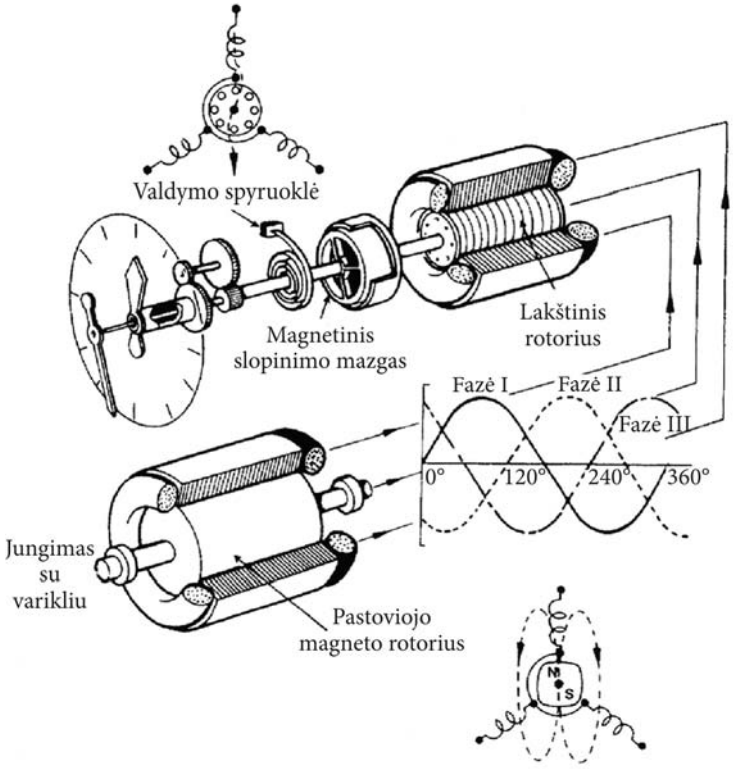
Aviacijoje naudojami magnetoindukciniai tachometrai, rodantys sūkių dažnį absoliučiais vienetais (aps/min.), ir tachometrai, kurių skalė sugraduota santykiniais vienetais – procentais. Visi šie prietaisai turi vienodą matavimo jautrųjį elementą (3.3.2 pav.) ir skiriasi tik kai kuriomis konstrukcinėmis ypatybėmis. Nagrinėsime tachometro, turinčio daugelio distancinių magnetoindukcinių tachometrų būdinguosius mazgus, konstrukciją.

Į tachometro komplektą įeina sinchronine pavara (3.3.3 pav.) sujungti sūkių daviklis ir rodiklis (3.3.4 pav.). Į kitų tachometrų komplektus gali įeiti: vienas arba du generatoriai ir vienas rodiklis arba vienas generatorius ir vienas arba du rodikliai.

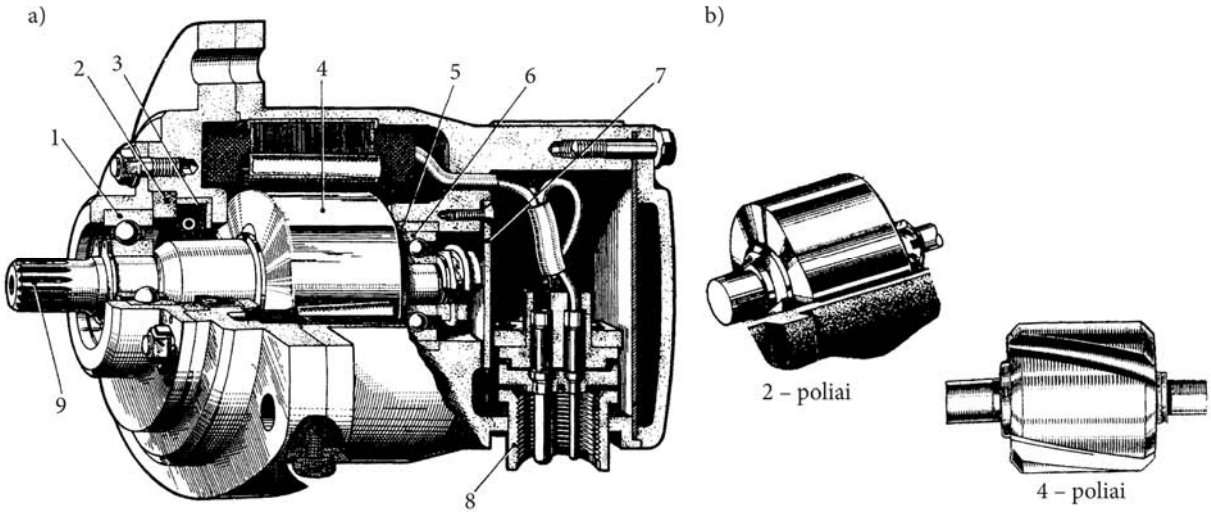
Daviklis – tai trifazis kintamosios srovės generatorius (3.3.5 pav., a) su dviejų polių pastovaus magneto rotoriumi (3.3.5 pav.,b).

Rotorius liejamas iš specialaus lydinio tiesiai ant įvorės, tvirtai sujungtos su velenu, kuris baigiasi krumpliaračio pavidalo kotu *8*, jungiančiu daviklį su aviacinio variklio velenu. Pakankamai tamprus daviklio velenas gerai atlaiko sukamuosius virpesius, atsirandančius kintant sukimosi dažniui, ir kompensuoja nedidelius išilginius nuokrypius, kurie galimi sumontavus daviklį. Generatoriaus rotoriaus velenas įtaisytas dviejuose rutuliniuose guoliuose *1* ir *6*. Generatoriaus statorius yra daviklio korpuse ir gaubia rotorių. Statorius pagamintas iš plonų izoliuotų transformatorinės geležies plokštelių rinkinio ir turi daug išdrožų, kurios išklotos 2-jų sluoksnių ir 4-jų polių trifaze apvija. Fazinės apvijos yra sujungtos žvaigžde. Montavimo laidai, einantys nuo rodiklio link generatoriaus, prijungti kištukine junge *8*.

3.3.6 pav. pateikta tachometro rodiklio konstrukcija. Rodiklį sudaro sinchroninis variklis, sukantis magnetinę sistemą, ir matavimo mechanizmas su slopintuvu ir rodmenų atskaitymo įtaisu.



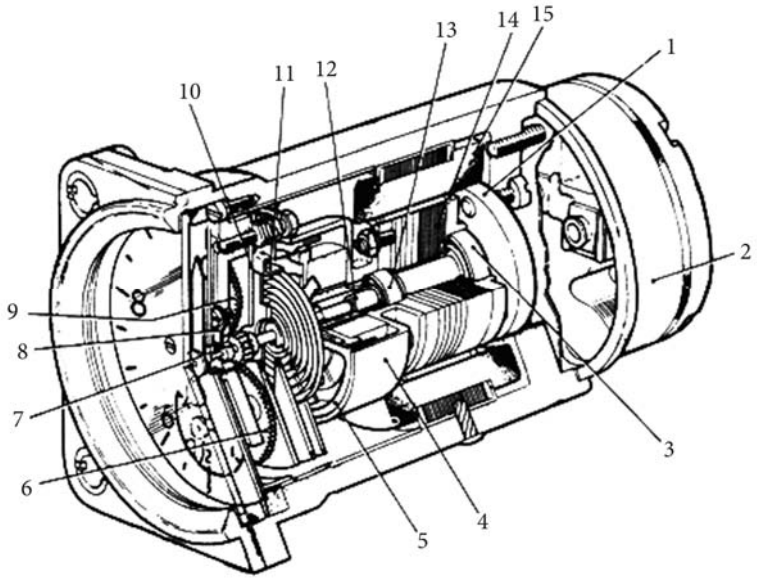
3.3.4 pav. Sūkių daviklio ir rodiklio sujungimo elektrinė-kinetinė schema



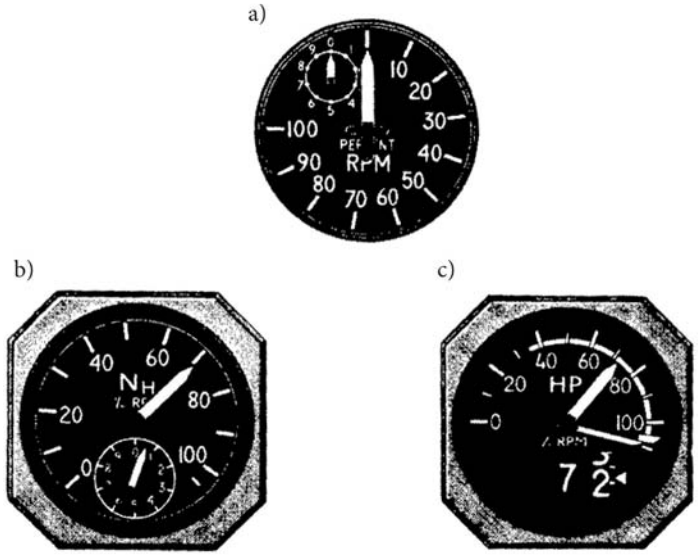
3.3.5 pav. Tachometro generatorius – daviklis (a) ir jo rotoriaus tipai (b): 1, 6 – rutulinis guolis; 2, 5 – riebokšlis; 3 – sandarinimo tarpiklis; 4 – dviejų polių pastovaus magneto rotorius; 7 – sandarinimo dangtelis; 8 – kištukinė jungtis; 9 – jungimo kotas

Daviklio generatoriaus sukelta įtampa 3-jų laidų ryšio linija (3.3.5 pav.) per elektrinę jungtį patenka į rodiklio sinchroninio variklio statoriaus *15* apviją. Variklio statorius sudarytas iš geležies plokštelių paketo, ant kurio yra trifazė apvija. Variklio rotorius, įtaisytas rutuliniuose guoliuose *3, 13* ir sudarytas iš 2-jų kryžminių magnetų ir 3-jų histerezinių diskų, pritvirtintų ant įvorės. Magnetai laisvai juda rodiklio veleno *12* atžvilgiu ir sujungti su juo spyruoklė *11*, perduodančia velenui sukimo momentą. Spyruoklė leidžia magnetams suktis veleno *12* atžvilgiu ir sinchronizuotis iki visiško sukimo momento jam perdavimo. Veleno *12* gale tvirtinamas magnetinis mazgas *4*, sudarytas iš 2-jų plokščių su į jas įpresuotomis 6-omis magnetų poromis. Ant magnetų užmautas termomagnetinis šuntas. Oro tarpe tarp magnetų galų yra JE slopinimo diskas *5*, pagamintas iš aliuminio ir mangano lydinio, turinčio mažą elektrinės varžos temperatūrinį koeficientą. Prie disko *6* ašies tvirtinamas vienas besipriešinančios spyruoklės galas ir rodyklė. Ant tos pačios ašies pritvirtintas ir slopinimo diskas *5*. Prietaisas turi skalę, sugraduotą nuo 0 iki 10 % , ant kurios yra užrašas „sūkiai“.

Matuojant variklių sūkių dažnį laike, siekiant greitai įvertinti matavimų rezultatus, dažnai naudojami sudvejintos indikacijos rodikliai (3.3.7 pav.).



3.3.6 pav. Sūkių indikatorius: 1 – konsolės velenas; 2 – korpuso galinis mazgas; 3, 13 – galinis ir priekinis rotoriaus rutuliniai guoliai; 4 – magnetinis mazgas; 5 – slopinimo diskas; 6 – disko-rodyklės ašis ir pavara; 7 – rodyklės ašies guolis; 8 – perdavimo fiksavimo antgalis; 9 – jungiamasis PDM; 10 – pozicionavimo plokštė; 11 – spyruoklė; 12 – rodiklio velenas; 14 – rotorius; 15 – statorius



3.3.7 pav. Dvigubo pateikimo tachometrų rodikliai: a – sinchroninio variklio tipo; b – variklių sukimo momento indikacijai; c – pagalbinis langelis / rodyklė indikatorius

Tokiu atveju pagrindinės procentinės skalės kalibruojamos nuo 0 iki 100 % su prieauglio padalomis po 10 %, kai 100 % atitinka optimalų turbinos sūkių dažnį. Siekiant tiksliau vertinti optimalų sūkių dažnį, įvedama antroji rodyklė su 1 % padalos verte.

Elektromechaninai tachometrai. Šie tachometrai naudojami kai kuriuose didelių keleivinių oro transporto lainerių tipuose, kada pirmenybė teikiama įrenginiams, leidžiantiems gauti matuojamąjį dydį atitinkantį signalą elektriniu pavidalu. Tokio tipo sūkių dažnio daviklio konstrukcijos pavyzdys pateiktas 3.3.8 pav.

Nerūdijančio plieno hermetiniame korpuse (3.3.7 pav.) įtaisytas keitiklio jutiklis turi mechaninę jungtį, pastovųjį magnetą ir keletą vario-nikelio ar nikelio-chromo vielos 7 ričių, apvyniotų ant feromagnetinės šerdies. Specialiosios apvijos (nuo 5-ių iki 7-ių priklausomai nuo keitiklio tipo) skirtos variklio sūkių greičio duomenims perduoti į indikatorių ir kitus įrenginius. Keitiklis turbinos sūkių greičio

pokyčiams matuoti junge tvirtinamas prie veleno aukšto slėgio kompresoriaus sekcijoje arba įtaisomas turboventiliatoriaus skyriuje.

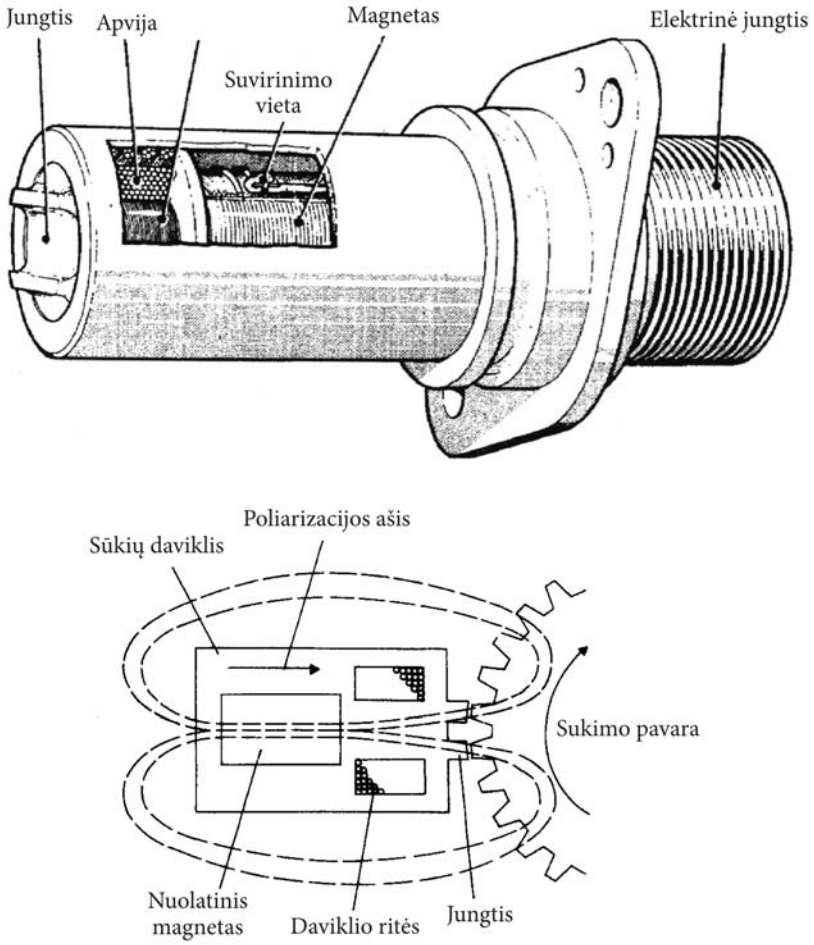
Pastovusis magnetas sukelia magnetinį lauką aplink apvijas, ir kada mechaniškai sujungtos su sūkių greičio matavimo objektu daviklio ritės pradeda suktis aplink savo feromagnetinę ašį pastoviojo magneto lauke, jų apvijose indukuojasi kintamoji elektrovaros (EVJ) jėga, kurios amplitudė priklauso nuo matuojamų sūkių greičio. Kintant veleno sukimo momentui ir kartu sūkių greičiui, keičiasi ir ritėse indukuojamos EVJ amplitudė.

Specialiųjų apvijų dėka kintamosios EVJ įtampos išėjimo signalas, siekiant atvaizduoti sūkių greičio kitimą, tiekiamas į sukimo momento tipo rodiklį (3.3.7 pav., b). Prieš tai signalas praleidžiamas pro apdorojimo modulį (3.3.9 pav.), kur sumuojamas su servopotenciometro ir tarpinio stiprintuvo išėjimo įtampa. Po sumavimo signalas praeina servostiprintuvą ir indikatoriaus rodyklės posūkiu, atvaizduoja sūkių greitį laike atitinkančius daviklio signalo pokyčius.

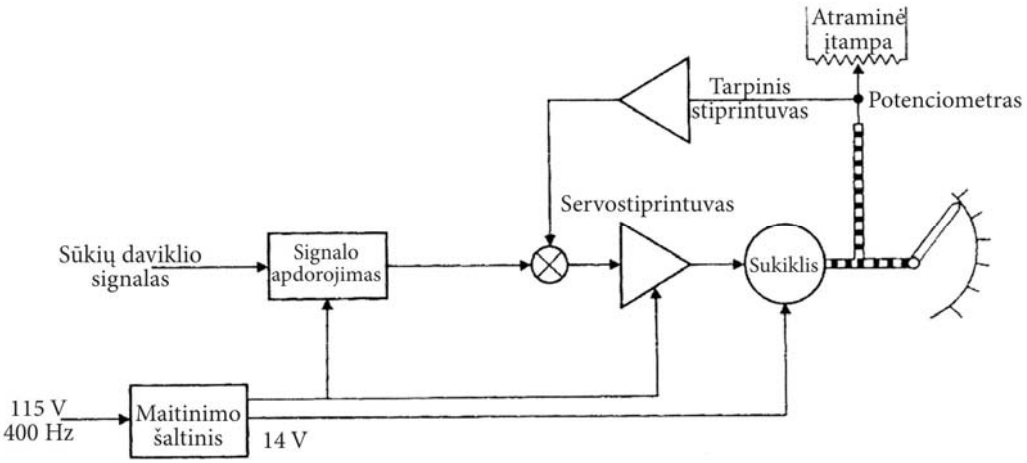
Maitinamas atramine įtampa servopotenciometras ir tarpinis stiprintuvas sudaro matavimus stabilizuojančią grįžtamojo ryšio grandinę, esant atsitiktiniams signalo pokyčiams, kaip tai atliekama kituose įrenginiuose spiraline balansavimo spyruokle.

Sūkių dažnio sinchronizavimo sistemos. Šios sistemos naudojamos turbosraigtinių variklių sūkių dažniams sinchronizuoti, kai orlaivyje būna du ar daugiau variklių. Tokių sistemų variklių sinchroninio darbo indikatorių pavyzdžiai parodyti 3.3.10 pav.

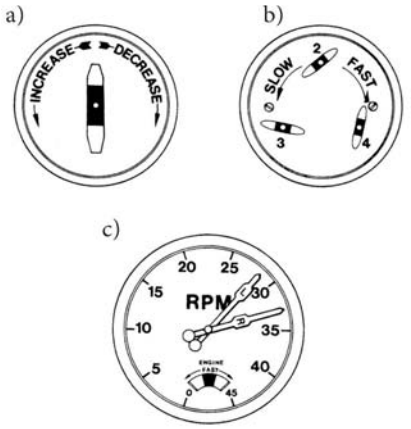
Valdančiojo trifazio generatoriaus (sinchroskopo) elektromagnetinių statoriaus ir rotoriaus apvijos atitinkamai jungiamos (3.3.11 pav.) su kelių (šiuo atveju – dviejų) valdomųjų trifazių generatorių, turinčių pastoviojo magneto rotorius, elektromagnetinių statorių apvijomis.



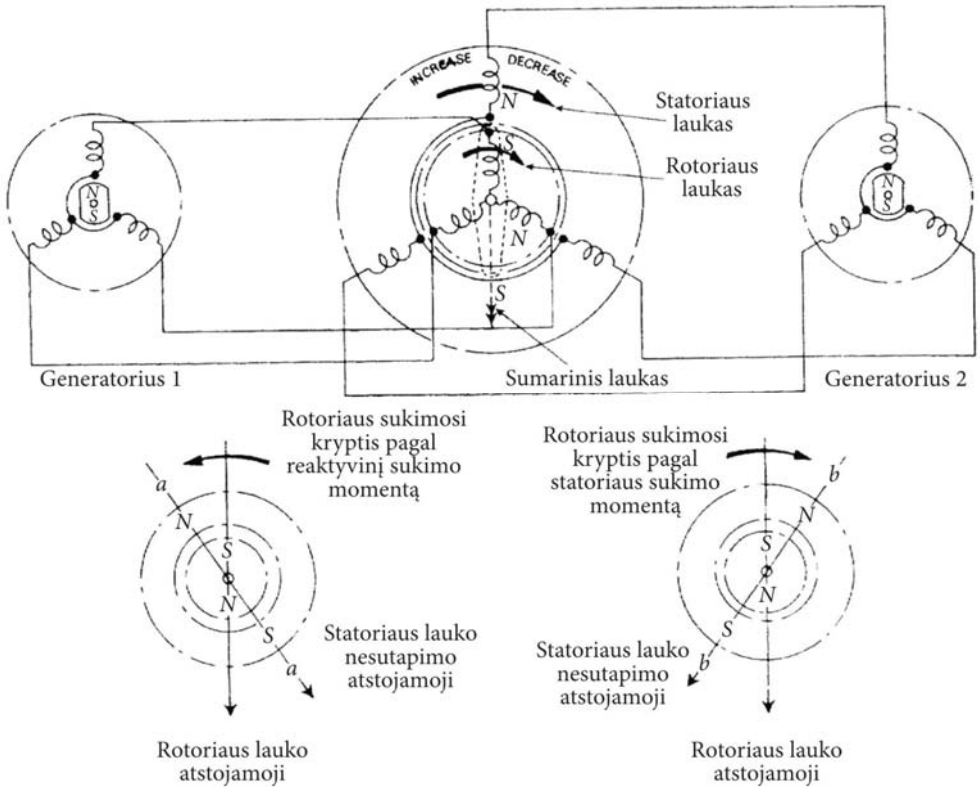
3.3.8 pav. Sūkių dažnio keitiklis į elektrinį signalą



3.3.9 pav. Variklio sūkių momento matavimo schema



3.3.10 pav. Tachometrinių sinchroskopų indikatoriai: a – 2 ir b – 4 varikliai; c – mišrusis dvigubas tachometras ir sinchoskopas



3.3.11 pav. Tachometrinio sinchroskopo principinė schema

Kai valdomieji generatoriai sukasi sinchroniškai, valdančiojo generatoriaus statoriaus ir rotoriaus elektromagnetinių laukų atstojamųjų kryptys sutampa. Prietaiso rodiklio (3.3.10 pav., a) žymeklis rodo sūkių balansą. Jei valdomieji generatoriai sukasi nesinchroniškai, valdančiojo generatoriaus rotoriaus elektromagnetinio lauko atstojamoji nukrypsta nuo statoriaus lauko atstojamosios krypties ir kampų, apibūdinančių sūkių disbalanso ženklą bei dydį (3.3.10 pav.). Atitinkamai valdomas ir sinchronizatoriaus rodiklio žymeklis (3.3.10 pav.).

3.4. Degalų ir tepalų debitometrai

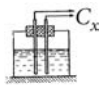
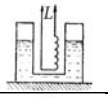
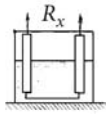
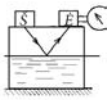
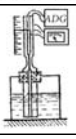
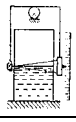
3.4.1. Paskirtis ir klasifikavimas

Kuro masė orlaivyje siekia 50–60 % jo pakilimo masės, todėl yra labai svarbus degalų atsargų nustatymas. Be to, labai svarbu žinoti variklių alyvos kiekį.

Skystojo kuro ir alyvos masės (kiekio) matavimas orlaivyje atliekamas matavimo prietaisais, kurie skirti: kuro ir alyvos masei matuoti bakuose, kiekvienam varikliui tenkančiai bendrajai kuro masei sparne ar orlaivyje nustatyti, kuro sunaudojimo iš bakų arba bakų užpildymo kuru sekai automatiškai valdyti, kurui perpumpuoti iš vienų bakų į kitus, kad būtų palaikomas orlaivio masės centravimas, automatiškai valdyti, signalizuoti apie kuro ir alyvos atsargų kritinį likutį.

3.3 lentelėje pateikta kuro ir alyvos lygio matuoklių klasifikacija pagal taikytiną matavimams principą.

3.3 lentelė. Kuro arba alyvos lygio matavimo principai

Matavimo metodas	Veikimo principas	Principinė schema	Pastaba
Plūdinis	Plaukiančios kure plūdės lygio nustatymas		Matuojamas kuro lygis
Kondensatoriaus *C* talpinės varžos	Daviklio talpinės varžos priklausomybė nuo kuro lygio ir jo savybių		Matuojama kuro masė arba lygis
Induktyvinis	Induktyvumo ritės elektrinių nuostolių priklausomybė nuo kuro lygio		Matuojamas elektrai laidžių skysčių lygis
Rezistyvinis	Rezistoriaus, kuris yra kure, varžos R_x kitimas kintant lygiui		Matuojamas elektrai laidžių skysčių lygis
Akustinis (*Š* – bangų siuntiklis; *Ė*– ėmiklis)	Ultragarso savybė atsispindėti nuo skysčio paviršiaus		Matuojamas kuro lygis
Radiointerferencinis (*ADG* – aukštojo dažnio generatorius)	Įtampos ir srovių pasiskirstymo ilgoje dvilaidėje linijoje priklausomybė nuo kuro lygio		Matuojamas kuro lygis
Radioizotopinis	Radioizotopų intensyvumo kitimas kuro sluoksnyje		Matuojamas kuro lygis

Aviacijoje dažniausiai yra paplitę plūdiniai ir talpinės varžos kuro lygio matavimo prietaisai. Išsamiau panagrinėsime kiekvieno iš jų veikimo ir sudarymo būdus.

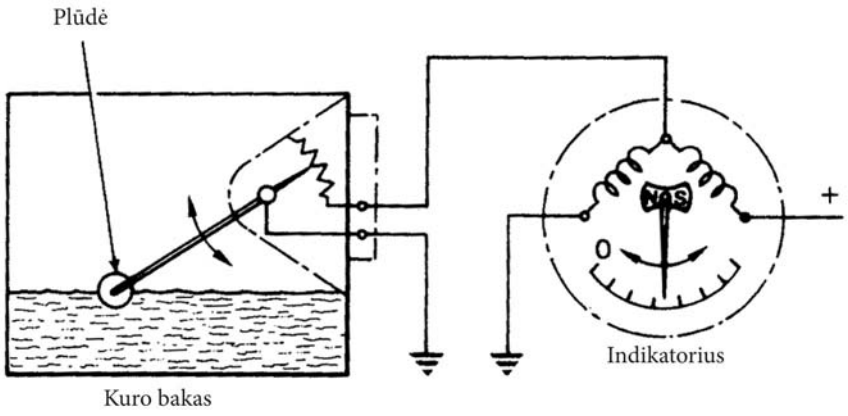
3.4.2. Plūdiniai kuro lygio matuokliai

Plūdinio kuro lygio matuoklio schema pateikta 3.4.1 pav. Matavimo davikliu šiuose prietaisuose yra tuščia metalinė arba iš putos plastiko pagaminta plūdė. Šios plūdės forma ir dydis priklauso nuo bako konfigūracijos, kuro tipo ir prietaiso eksploatavimo sąlygų. Labiausiai paplitusios stačiakampės plūdės. Plūdės po-

slinkis pagal kuro lygį keičiamas į reostato šliaužiklio kampinę padėtį svirtiniu mechanizmu. Norint gauti keitiklio varžos dydžio tiesinę priklausomybę nuo kuro tūrio sudėtingos formos bake, keitiklis turi būti atitinkamai profiliuojamas, t. y. vielinio reostato karkasas gaminamas pagal kiekvieną baką atitinkantį profilį.

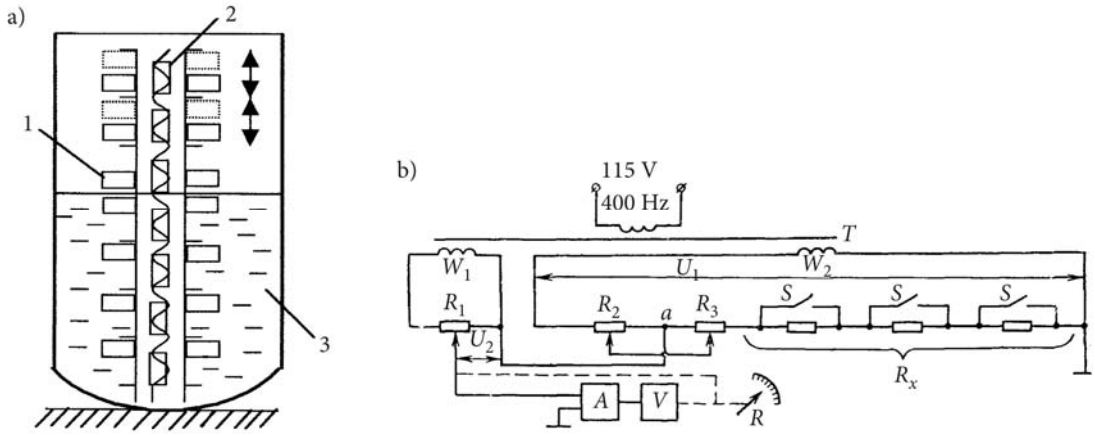
Keitiklio varža pagal reostato (3.4.1 pav.) schemą įjungiama į du neišbalansuoto pastoviosios srovės matavimo tiltelio pečius, kurio kitus du pečius sudaro rezistoriai. Tiltelio schemos pečių rezistorių santykiui atvaizduoti naudojamas dviejų rėmelių santykio matuoklis su judamuoju magnetu arba judamaisiais rėmeliais. Norint signalizuoti momentą, kada pasiekiamos numatytos kuro kiekio reikšmės, kuro lygio keitikliuose naudojami maži jungikliai, kurie suveikia, esant nustatytai potenciometrinio elemento šliaužiklio padėčiai.

Tokie kuro matuokliai pakankamai paprasti, tačiau turi daug specifinių trūkumų: matuojama ne kuro masė, o jo lygis arba tūris; judamosios detalės apsunkina daviklių montavimą bakuose, o lankstų užteršimas eksploatavimo metu trikdo prietaiso veikimą; sunku hermetiškai atskirti varžos daviklį nuo bako talpos; rodmenys priklauso nuo orlaivio padėties kampų, taip pat nuo pagreičių, kurie veikia plūdes; temperatūrų pokyčiai turi įtakos santykio matuoklio rėmelių varžai. Jai sumažinti į tiltelio pusinę įstrižainę jungiami papildomi rezistoriai, kurių vienas pagamintas iš varinės, kitas – iš manganino vielos. Pagrindinė santykinė plūdinių tokio tipo kuro lygio matuoklių paklaida ±2,5 % nuliniu lygiu ir ±5 % kitais lygiais.



3.4.1 pav. Plūdinio kuro lygio matuoklio principinė schema

Tikslesni yra kuro lygio matuokliai su herkoniniais plūdžių fiksatoriais (3.4.2 pav.).Tokio tipo kuro lygio matuoklio principinė elektrinė schema pateikta 3.4.2 pav., b.



3.4.2 pav. Kuro lygio daviklio su herkonais bendroji (a) ir principinė elektrinė (b) schemos:
1 – plūdė; 2 – herkonas; 3 – bakas

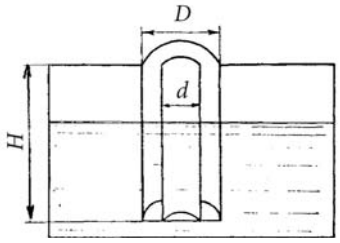
Priklausomai nuo kuro lygio didėja plūdžių skaičius, kurių magnetai sujungia atitinkamus herkonų kontaktus, dėl ko keičiasi ir daviklio suminė varža R_X. Daviklio varža R_X įjungta į daliklio *R2, R3* petį, kuris maitinamas įtampa U_1 nuo transformatoriaus *T* apvijos W_2.

Kintamosios įtampos daviklio taško ***a*** įtampa priklauso nuo daviklio varžos R_X dydžio, kuris proporcingas kuro lygiui. Ši įtampa prijungta nuosekliai priešinga faze (skirtingais poliais) prie įtampos U_2, kuri tiekiama nuo įtampos daliklio *R1*, maitinamo nuo apvijos W_1. Įtampa, kuri lygi įtampų U_1 ir U_2 skirtumui, dėl priešingo jų sujungimo veikia stiprintuvo A įėjime. Ji sustiprinama stiprintuvu A ir valdo dviejų fazių indukcinį variklį *V*, kuris per reduktorių paslenka rezistoriaus *R1* šliaužiklį ir rodiklio *R* rodyklę. Esant įtampų U_1 ir U_2 lygybei, variklis sustoja, o rodyklė rodo kuro kiekį bake.

Tokio kuro lygio matuoklio trūkumas yra matavimų rodmenų diskretiškumas, priklausomybė nuo temperatūros ir kuro tipo. Privalumas – galimybė įtaisyti daviklį sudėtingesnės formos bakuose ir galimi nedideli vamzdelio nukrypimai nuo vertikaliosios padėties kuro atžvilgiu.

3.4.3. Talpiniai kuro lygio matuokliai

Talpinių kuro lygio matavimo prietaisų veikimo principas pagrįstas daviklio talpinės varžos priklausomybe nuo kuro lygio ir jo dialektrinės skvarbos.



3.4.3 pav. Kuro lygio matuoklio talpinės varžos daviklis

Kuro lygio matuoklio talpinės varžos daviklis (3.4.3 pav.) sudarytas iš dviejų ar daugiau koncentriškai išdėstytų vamzdžių, įdėtų į kuro baką. Kai bakas tuščias, tokio kondensatoriaus talpa nustatoma pagal formulę:

$$C_X = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_{OR}H}{\ln\frac{D}{d}}, \tag{3.13}$$

čia *H* – daviklio ilgis, m; *D, d* – išorinio ir vidinio vamzdžių skersmenys, m $\varepsilon_0 = 8{,}85\times10^{-12}\left(\mathrm{F}/\mathrm{m}\right)$ – dialektrinė pastovioji; $\varepsilon_{OR} = 1{,}00059 \approx 1$ – oro santykinė dialektrinė skverbtis.

Kadangi angliavandenilių, prie kurių priskiriami kuras ir alyva, dialektrinė skverbtis ε_K yra didesnė negu oro (($\varepsilon_K = 1{,}9-2{,}2 \approx 2{,}0$), tai kondensatoriaus talpa padidės (o talpinė varža sumažės,) įpylus į baką kuro, ir priklausys nuo kuro lygio *h*:

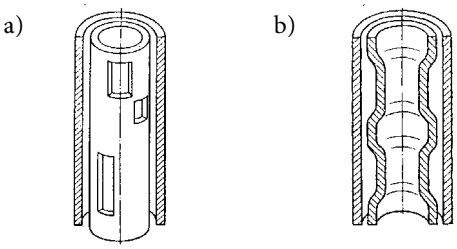
$$C_X = \frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln\frac{D}{d}}\left[\varepsilon_{OR}\left(H-h\right)+\varepsilon_K h\right]. \tag{3.14}$$

Tariant, kad $\varepsilon_{OR} = 1{,}0$ ir įvertinant žinomą kuro lygio priklausomybę nuo jo masės m bake, (3.14) formulę po nesudėtingų transformacijų galima pateikti šiuo pavidalu:

$$C_X = C_{X_0} + \frac{C_0}{S}\frac{\varepsilon_k - 1}{\rho}m, \tag{3.15}$$

čia $C_{X_0} = \frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln\frac{D}{d}}\cdot H$ – sauso daviklio talpa; $C_0 = \frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln\frac{D}{d}}$ – ilginė daviklio talpa; ρ – kuro tankis; *S* – bako skersinio pjūvio plotas.

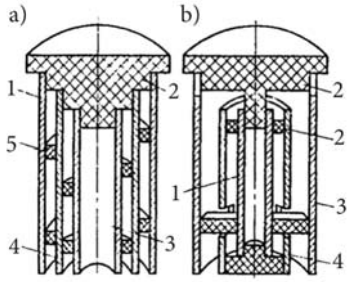
Daviklių konstrukcijos. Kaip matyti iš (3.15) išraiškos, daviklio talpa priklauso nuo kuro masės bake. Ši priklausomybė nekinta, kai kuro talpinis koeficientas $K=(\varepsilon_k-1)/S$ yra pastovus. Priklausomybė $C_X=f(m)$ yra tiesinė, jei santykis C_0/S pastovus. Taigi, kad išpildytų šią sąlygą, kintant kuro lygiui sudėtingos formos bake, reikia keisti ilginę daviklio talpą C_0, kintant S pagal bako aukštį. Tai pasiekiama profiliuojant daviklį (keičiant santykį D/d pagal daviklio aukštį), pavyzdžiui, šalinant dalį vamzdinio elektrodo arba keičiant kurio nors vamzdžio skersmenį (3.4.4 pav.).



3.4.4 pav. Profiliuotasis talpinis daviklis:
a – keičiant vamzdžio paviršių; b – keičiant vamzdžio skersmenį

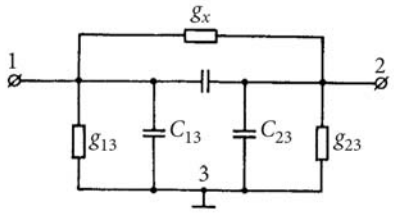
Paprastai profiliuotojo talpinio daviklio konstrukcijoje numatoma galimybė šiek tiek reguliuoti jo talpą (apytikriai 10 %) tam, kad būtų galima nustatyti daviklio pradinės talpos reikšmę ±1 % tikslumu. Priklausomai nuo reikiamos pradinės talpos ir daviklio aukščio, jame gali būti nuo 3 iki 6 vamzdžių. Nuo talpinio daviklio konstrukcijos taip pat priklauso jo parazitinių talpų reikšmės, talpinės varžos (laidumai) ir jų priklausomybė kintant. 3.4.4 pav. parodyti du skirtingų konstrukcijų talpiniai davikliai.

Vienoje konstrukcijoje (3.4.5 pav., a) visi daviklio vamzdžiai (*1, 4, 3*) tvirtinami prie vieno izoliacinio pagrindo *2*, kur tarp kiekvienos vamzdžių poros tarpui (ne mažesniam kaip 1,5 mm) sudaryti statomi izoliaciniai intarpai *5*. Kitoje konstrukcijoje (3.4.5 pav., b) kondensatoriaus elektrodai *3, 4* tvirtinami prie elektrodo *1* izoliatoriais *2*. Tokiame daviklyje tarp pagrindinių elektrodų (*3, 4*) nėra izoliatorių ir daviklis vadinamas trijų elektrodų davikliu, arba davikliu su atskirtais nuotėkiais. Pagrindinių elektrodų talpa abiejuose davikliuose kinta pagal tą patį dėsnį.



3.4.5 pav. Talpinio daviklio vamzdžių tvirtinimas:
a – prie vieno pagrindo; b – prie įžeminto elektrodo

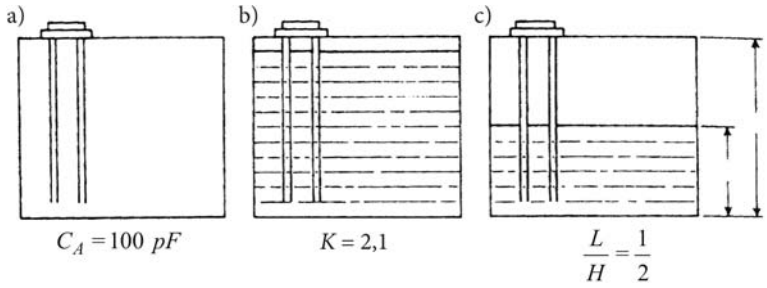
Ekvivalentinė elektrinė talpinio daviklio schema pateikta 3.4.6 pav. Schemoje nurodytos talpos ir kompleksiniai laidumai visada egzistuoja bet kokios konstrukcijos šio tipo davikliuose, nepriklausomai nuo vamzdžių skaičiaus (du ar daugiau). Tačiau jų reikšmės, ypač laidumo g_X reikšmė, priklauso nuo daviklio konstrukcijos. Šie laidumai atsiranda dėl laidumo per kurą, tarp elektrodų esančių izoliatorių medžiagoje, taip pat per izoliatorių paviršius. Pirmieji du laidumai yra pastovūs ir nedideli, o izoliatorių paviršių laidumas pakankamai didelis ir labai nepastovus.



3.4.6 pav. Talpinio daviklio ekvivalentinė elektrinė schema: C_X – tiesioginė daviklio talpa; C_{13}, C_{23} – dalinės (įžemintos) talpos tarp atitinkamų daviklio elektrodų ir korpuso 3; g_X, g_{13}, g_{23} – tiesioginis ir daliniai laidumai tarp daviklio elektrodų

Naudojant daviklius, izoliatorių paviršius užsiteršia elektrai laidžiomis apnašomis, patenkančiomis iš kuro (derva, priemaišos, vanduo). Todėl labai svarbu parinkti daviklio konstrukciją taip, kad izoliatorių paviršinių laidumų įtaka būtų minimali. Tai pasiekiama kuro kiekio matavimo prietaisuose naudojant trijų elektrodų talpinius daviklius.

Atliekant kuro lygio matavimą, talpinis daviklis įtaisomas kuro bake (3.4.7 pav.).



3.4.7 pav. Daviklio talpos tiesinė priklausomybė nuo kuro lygio

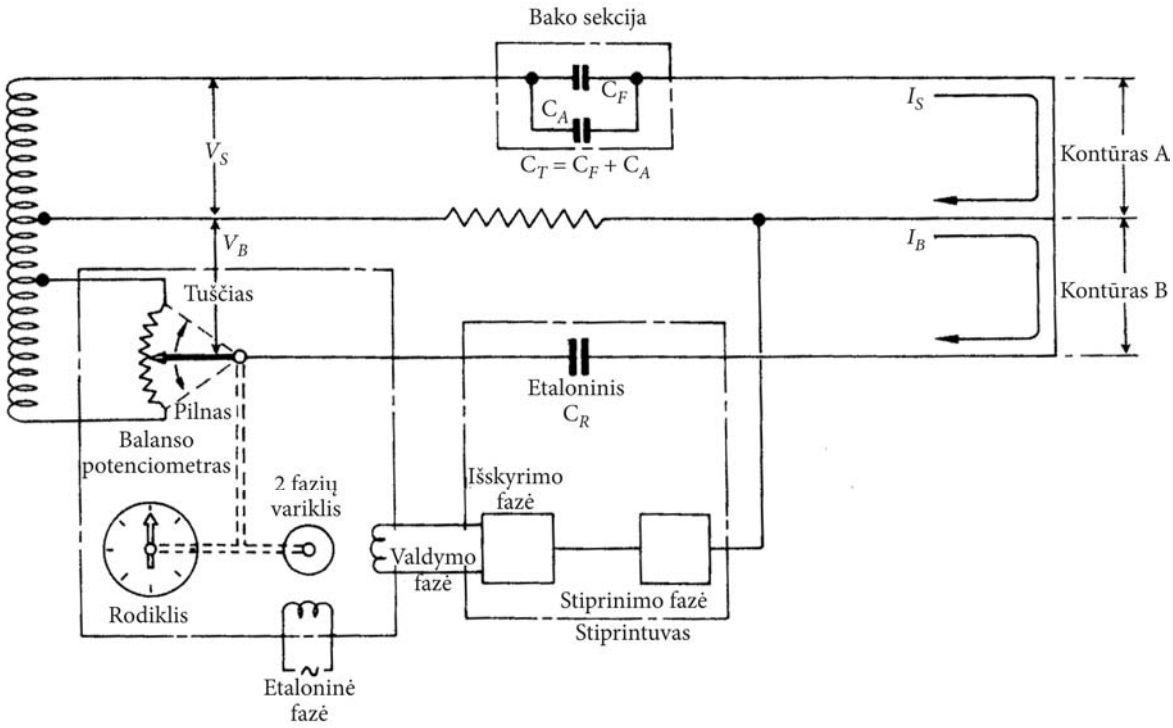
Talpinio kuro lygio matuoklio schema. Panagrinėsime tokią schemą, esant tiesinei daviklio talpos priklausomybei nuo kuro lygio bake (3.4.6 pav.). Tarkime, kad pilno ir tuščio kuro bako daviklio atitinkamų talpų C_T ir C_A santykis K = 2,1. Jei tuščio bako daviklio talpa C_A = 100 pF (3.4.5 pav., a), tai pilno bako daviklio talpa bus $C_T = C_A K$ = 210 pF. Daviklio talpos prieauglis pilname bake C_F = 110 pF. Tokiu atveju elektrinėje schemoje (3.4.7 pav.) baką su kuru galima pateikti kaip dviejų talpų C_A ir C_F lygiagretų sujungimą. 3.4.7 pav., c parodytas bakas tik pusiau užpildytas kuru, o įvertinant bako matmenų L ir H santykį, gausime talpinio daviklio kalibravimo formulę:

$$C_F = \frac{L}{H}(K-1)C_A . \tag{3.16}$$

Talpiniuose kuro matuokliuose daviklių talpai matuoti naudojami kintamosios srovės *RC* tilteliai. Tokio tipo talpos matavimo schema pateikta 3.4.8 pav.

Įjungtas į tiltelio įstrižainę varžas R skiria du tiltelio kontūrus – matavimo A ir balansavimo B, prijungtus prie antrinės kintamosios įtampos transformatoriaus apvijos. Tiltelis maitinamas kintamąja įtampa (25 V, 400 Hz).

Kontūre A yra pastovioji ir kintamoji daviklio talpos, sudarančios pilną kuro baką atitinkančią talpą C_T . Kontūre B įjungtas etaloninis kondensatorius C_R ir nuosekliai jam tiltelio balansavimo potenciometras, kurio šliaužiklis mechaniškai susietas su prietaiso matavimo rezultatų rodikliu ir dviejų fazių varikliu. Viena variklio apvija maitinama etaloninės fazės kintamąja įtampa, į kitą tiekiama valdymo fazės įtampa iš stiprintuvo, kurio įėjimas sujungtas su varžu R. Stiprintuvo paskirtis stiprinti tiekiama nuo varžo R išderinto tiltelio signalą ir atskirti tiltelio balansavimo signalo fazę.



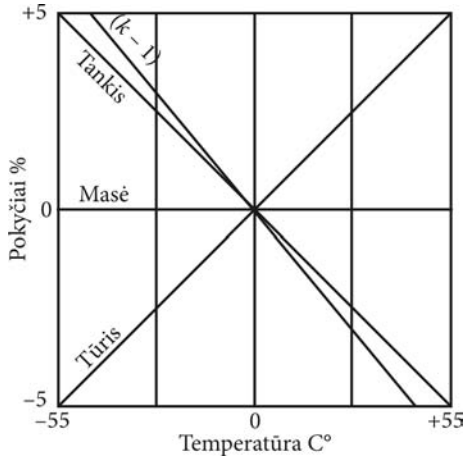
3.4.8 pav. Kuro kiekio matuoklio principinė elektrinė schema

Panagrinėsime, kaip veikia ši schema, atsirandant kuro sąnaudoms. Pradžioje, kai bakas pilnas ir kuro lygis nekinta, tekanti pro talpinį daviklį srovė I_S yra lygi balansuojančiajai srovei I_B , tekančiai kontūre B. Tiltelis subalansuotas pagal reaktyvinę (talpinę) pilnutinės daviklio varžos dedamąją ir jokios įtampos ant varžo R nėra.

Mažėjant kuro lygiui, daviklio pridėtinė talpa C_F mažėja ir atitinkamai mažėja srovė I_S, sukelianti tiltelio išbalansavimą. Ant varžo R atsiranda signalinė išbalansavimo įtampa, kuri stiprintuve stiprinama bei nustatoma tiltelio išbalansavimo fazė, priklausanti nuo to, kuris iš tiltelio kontūrų vyrauja. Nagrinėjamuoju atveju vyrauja balansuojančiojo kontūro srovė: taigi valdymo fazės srovė variklio maitinimo atraminės (etaloninės) srovės fazės atžvilgiu atsilieka, todėl variklis suksis į tokią pusę, kad sumažintų balansuojančiąją srovę I_B. Kai srovė I_B susilygina su srove I_S, tiltelis vėl subalansuojamas, variklis nustoja veikti, duomenų vaizduoklio rodyklė fiksuoja (rodo) skalėje naują, žemesnį kuro lygį.

Kuro temperatūros pokyčių poveikis. Natūralu, kad kintant kuro temperatūrai keičiasi ir jo savybės, todėl panagrinėsime, kokią įtaką tai turi kuro kiekio matavimams.

3.4.9 pav. pateikti grafikai apytikriai apibūdina kuro tūrio, tankio ir santykinės dialektrinės skvarbos (talpinio laidumo) priklausomybes nuo temperatūros pokyčių.



3.4.9 pav. Temperatūros įtaka kuro charakteristikoms

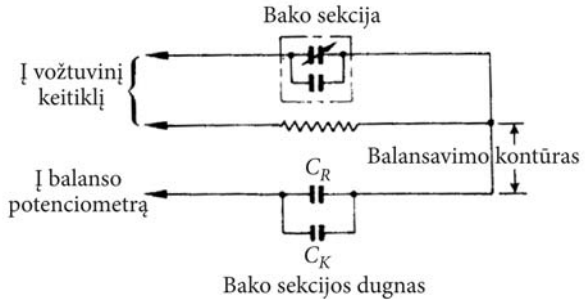
3.4.9 pav. pateiktas žinomas prietaiso kalibravimo veiksnys (3.16). K – 1 kitimo temperatūrų diapazone grafikas, kadangi kuro lygio matavimo sistemose duomenų vaizduoklio rodyklės judesys yra jam analogiškas. Nors kuro tankio kitimo grafikas nurodytame temperatūrų diapazone pakankamai artimas rodyklės kitimui, vis dėlto yra nedidelis skirtumas, kurį reikia įvertinti. Be to, galimi kai kurių kuro rūšių tankio skirtumai, esant vienodai temperatūrai. Pavyzdžiui, matavimo sistema sukalibruota koeficiento K reikšmei 2,1 turi kalibravimo veiksnį 2,1 – 1 = 1,1. Jei ta pati matavimo sistema bus naudojama matuoti kuro lygiui, kuriam K = 2,3, o kalibravimo veiksnys 1,3, prietaiso rodmenų paklaida bus apytikriai lygi: $(1{,}3/1)\cdot 100-100\%=18\%$.

Kuro masės (svorio) matavimas. Kaip žinoma, aviacinių variklių kuro sąnaudos, eikvojamos naudingajai varomajai energijai sukurti, tiesiogiai proporcingos ne tiek kuro kiekiui, kiek jo energetiniam potencialui, susietam su molekulių kiekiu, kuris variklyje gali jungtis su deguonimi. Kadangi apibūdinantis kuro masę ir svorį molekulių kiekis nepriklauso nuo kuro temperatūros ir tankio, sąnaudų vertinimas masės (svorio) vienetais yra perspektyvesnis ir tikslesnis. Toks kuro sąnaudų matavimas reikalauja kuro kiekio ir tankio nustatymo, t. y. temperatūros įtakos kuro kiekio matavimams eliminavimo. Paaiškinsime tai pavyzdžiu. Turime baką su 1000 l kuro, kurio tankis yra (0,8 g/cm^3). Matuojant kuro tūrį, rezultatas būtų 1000 l, matuojant svorį – 800 kg. Jei pakitus kuro temperatūrai tūris padidėtų 10 %, tūrinio matavimo rezultatas taptų 1100 l, o svorinio nepasikeistų, kadangi kuro tankis, lygus svorio ir kiekio santykiui, atitinkamai sumažėtų.

Atliekant kuro kiekio matavimus masės (svorio) vienetais, įprasta tarti, kad talpinio kalibravimo veiksnio K – 1 ir kuro tankio ρ santykis yra pastovus (žr. (3.15) formulę). Matavimo sistemoje, kalibruotoje santykiu $\frac{K-1}{\rho}$, vadinamuoju talpiniu indeksu, vis tik lieka kai kurių nedidelių matavimo netikslumų. Juos galima iliustruoti pavyzdžiu. Jei matuojamojo kuro kiekio talpinis kalibravimo koeficientas K = 2,1, nominalusis kuro tankis ρ = 0,779, tai talpinis indeksas yra $\frac{2{,}3-1}{0{,}775}=1{,}412$. Jei ta pačia sistema matuojamas kitos rūšies kuro kiekis, kurio K ir ρ reikšmės bus 2,3 ir 0,85, tada jo indeksas padidės: $\frac{2{,}3-1}{0{,}85}=1{,}529$. Tai procentinis matavimų nuokrypis bus $\frac{1{,}529}{1{,}412}\cdot 100-100\%=8\,\%$.

Kompensacinės kuro kiekio matavimo sistemos. Metodinei paklaidai, atsirandančiai kintant kuro talpiniam koeficientui K (3.15), kompensuoti, kuro kiekio matuoklyje yra specialus kompensavimo talpinis daviklis, kurio talpa C_K.

Kompensacinio daviklio talpa C_K jungiama lygiagrečiai prie (3.4.10 pav.) etaloninio kondensatoriaus C_R. Kompensacinis daviklis realizuojamas naudojant koncentrinius vamzdelius, plokšteles, esančias cilindriniame ekrane, arba koaksialinio kondensatoriaus pavidalu. Daviklis yra nuolat panardintas kure ir jo talpa priklauso tik nuo kuro dialektrinės skvarbos. Esant normaliai temperatūrai ir standartizuotos rūšies kurui, daviklio talpa C_K turi konkrečią reikšmę. Tarkime, kad kintamosios srovės tiltelis schemoje (3.4.9 pav.) yra subalansuotas.



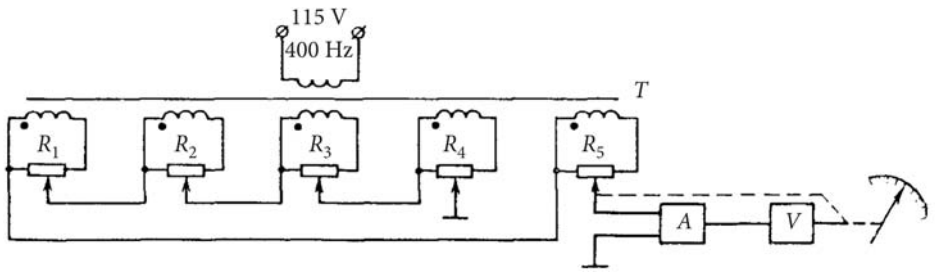
3.4.10 pav. Kompensavimo kondensatorių jungimo schema

Pasikeitus kuro temperatūrai arba jo rūšiai, keisis daviklio, skirto kuro lygiui matuoti, keisis koeficiento K reikšmė ir atitinkamai daviklio talpa dydžiu ΔC_X. Matavimo tiltelio išėjime (varžas R) atsiras disbalanso įtampa, sukelianti kontūro B srovės I_B dominavimą. Tuo pat metu dėl kuro dialektrinės skvarbos ε_K pokyčio dydžiu ΔC_K pasikeis kompensacinio daviklio talpa ir kompensacinio tiltelio išėjime atsiras priešingos fazės įtampa, mažinanti srovės I_B dominavimą.

Pilna temperatūros ir kuro rūšies pokyčių kompensacija pasiekiama, jei: $(\delta K/\delta\varepsilon_K)=1$, čia $\delta K=\dfrac{\Delta K}{K_0}$ – santykinis talpinio koeficiento pokytis; K_0 – etaloninio kuro talpinis koeficientas, esant normaliai temperatūrai; $\delta\varepsilon_K=\dfrac{\Delta\varepsilon_K}{\Delta\varepsilon_{k0}}$ – sąlyginis kuro dialektrinės skvarbos pokytis.

Tačiau dėl esamo santykio $\delta K/\delta\varepsilon_K$ nepastovumo metodinę paklaidą visiškai kompensuoti pakankamai sudėtinga.

Aprašyto tipo kuro matavimo sistemos yra vadinamos ***kompleksinėmis*** ir taip pat naudojamos suminėms kuro atsargoms matuoti keliuose bakuose arba jų grupėse. Ilgų magistralių orlaiviuose suminės kuro atsargos matuojamos kartu su kuro kiekiu bakuose. Tai atliekama taip. Kiekvienas kuro bakas turi savus matavimo ir kompensacinį tiltelius. Automatiškai balansuojant kiekvieną matavimo tiltelį, matavimo sistemos balansavimo variklis perstumia ir papildomo (suminio) kanalo potenciometro šliaužiklį (3.4.11 pav.).



3.4.11 pav. Suminių kuro atsargų kiekio nustatymo principinė elektrinė schema

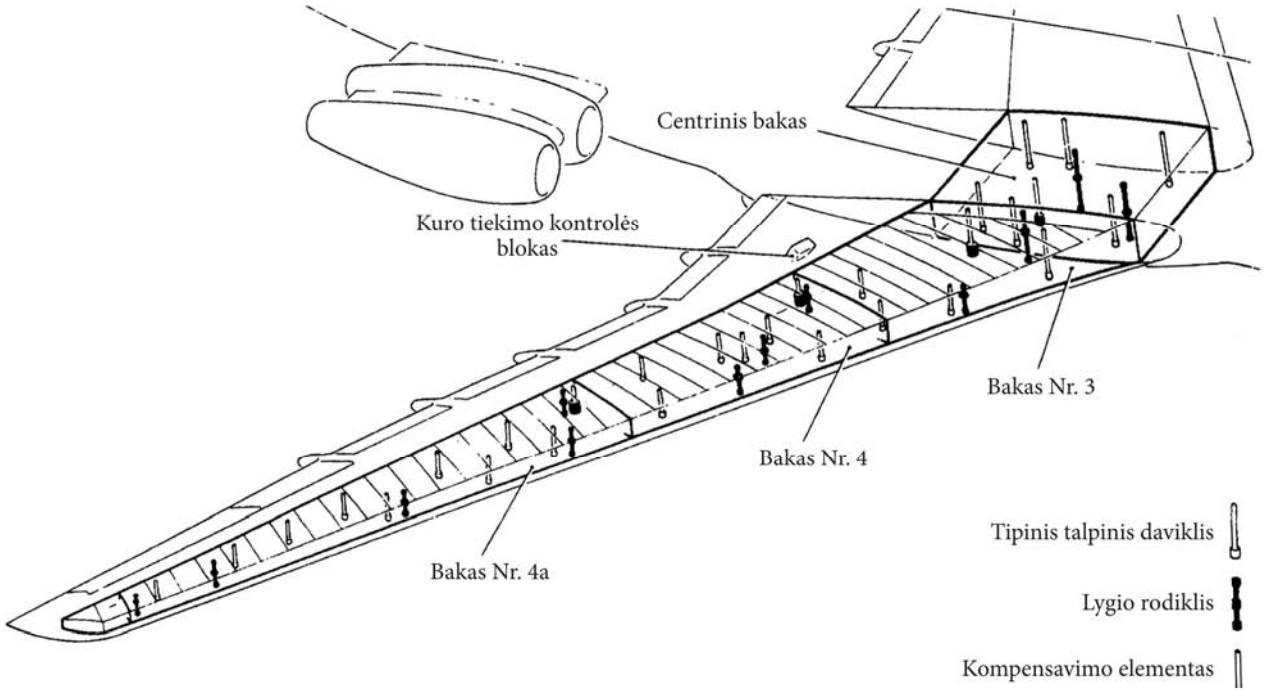
Į kiekvieną sumuojamą potenciometrą nuo transformatoriaus T apvijų tiekiama kintamosios srovės įtampa, kurios reikšmė proporcinga maksimaliam kuro kiekiui bake. Visų potenciometrų išėjimo įtampos sumuojamos. Suminė įtampa lyginama su automatiškai valdomo įtampos daliklio *R5* įtampa. Šių įtampų skirtumas, sustiprintas stiprintuvo A, perduodamas į valdomo variklio V apvijas, kuris, stumdamas potenciometro šliaužiklį, sumažina įtampų skirtumą iki nulio. Kartu variklis V perstumia rodyklę kampu, proporcingu suminiam kuro kiekiui.

Pagrindinė santykinė matavimo paklaida, būdinga tokio tipo prietaisų ir sistemų grupei, skalės nuliniu lygiu yra ±2 %, kitose skalės žymėse – ±4 %.

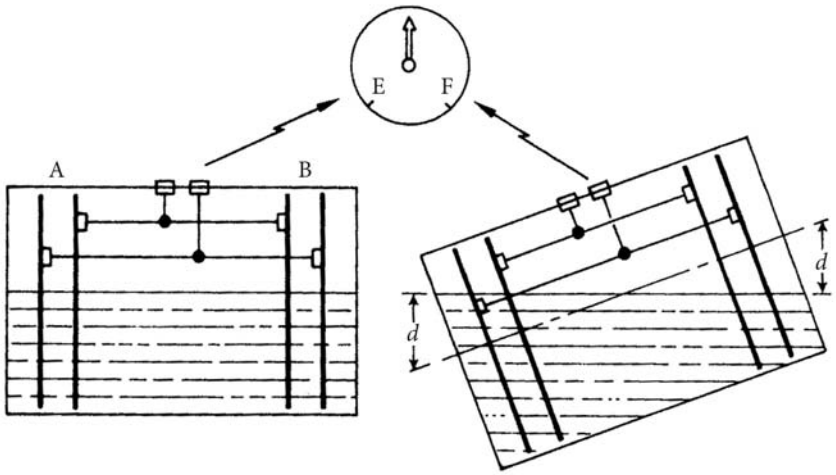
Matavimo elementų išdėstymas kuro bakuose. Praktiškai naudojamose talpinio tipo kuro lygio nustatymo sistemose montuojama daug matavimo elementų, kaip tai parodyta 3.4.12 pav., kurios lygiagrečiai jungiamos prie lygio rodiklių.

Toks matavimo elementų sujungimas daro kuro matavimo sistemą nepriklausomą nuo orlaivio padėties oro erdvėje pokyčių, kurie yra neišvengiami skrydžių metu. 3.4.13 pav. pateiktas pavyzdys, kuriame pateiktos dvi bako sekcijos su pusės bako kuro lygiu kiekviena. Tokiu atveju kuro lygio rodiklis rodo pusės bako lygį. Jei viena iš sekcijų palenkta, bet kuro kiekis išlieka tas pats, daviklis A yra giliau panardinamas į kurą atstumu d ir įgauna daugiau talpos. Rodiklis turėtų rodyti kuro lygio padidėjimą, tačiau, kadangi daviklis B yra ištraukiamas iš kuro tokiu pat atstumu d, jis praranda tokį patį talpos dydį. Vadinasi, bendrasis talpinis laidumas išlieka toks pats ir rodiklio rodmenys nekinta.

Daugumoje atvejų bako elementai suprojektuoti vidiniam montavimui, jų jungtys išvedamos per bakų sieneles. Tipiniai ir kompensavimo davikliai pavaizduoti 3.4.14 pav.



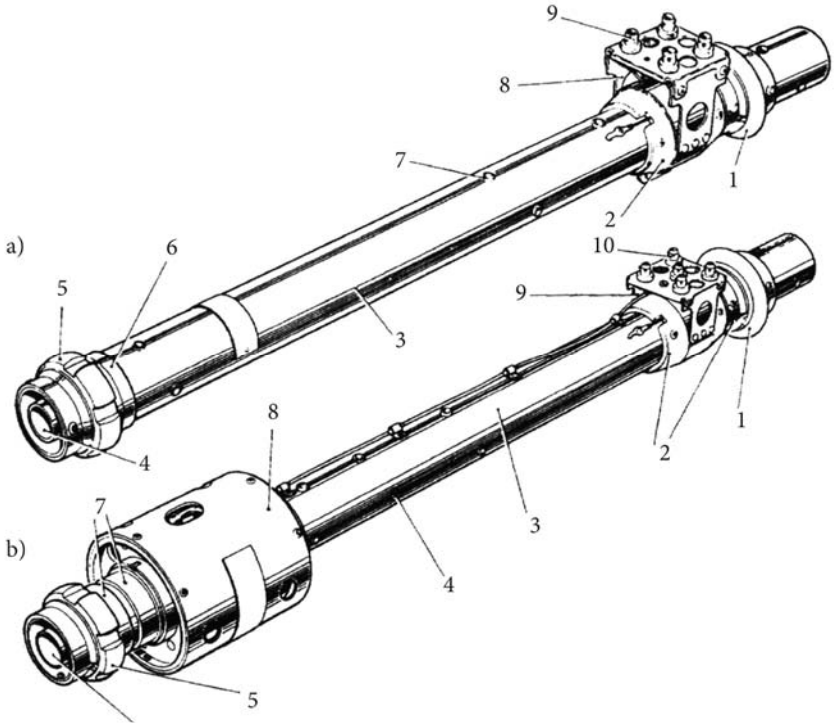
3.4.12 pav. Talpinių daviklių išdėstymas orlaivio kuro bakuose



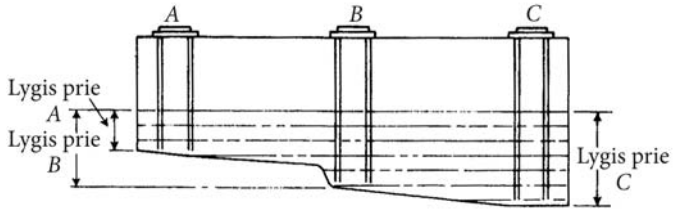
3.4.13 pav. Orlaivio padėties kompensavimas

Talpinių daviklių vamzdeliai pagaminti iš aliuminio lydinio ir atskirti tarpusavyje žiediniais izoliatoriais. Elektrinės koaksialinės jungės įtaisytos ant specialaus kronšteino, pritvirtinto ant neiloninės movos, saugančios viršutinę vamzdelio dalį. Dvi kitos neiloninės movos saugo išorinį vamzdelį, prie kiekvienos iš jų pritvirtintas guminis žiedas. Papildomas kompensavimo daviklis sudarytas iš trijų koncentrinių vamzdelių, atskirtų izoliuojančiomis detalėmis.

Būdingieji kuro bakų elementai. Orlaivio kuro bakai konstruojami kaip atskiri bendrosios kuro talpyklos sistemos vienetai, montuojami simetriškai orlaivio sparnų erdvėse ir liemenyje taip, kad būtų nepažeidžiamas orlaivio masių centravimas. Tai reiškia, kad atskiri bakai arba jų sekcijos gali turėti skirtingą formą ir gabaritus. Atsižvelgiant į formą ir išdėstymo vietą, juose turi būti įrengti atitinkami matavimo elementai. 3.4.15 pav. vaizduoja bako sekcijos, montuojamos sparno ertmėje, formą. Kaip matyti, bako sekcijoje montuojami skirtingi talpiniai davikliai. Jų talpa kinta, atitinkamai kintant bako formai.



3.4.14 pav. Bako tipinis talpinis (a) ir kompensavimo (b) davikliai: a) 1, 5 – guminis žiedas; 2, 6 – neloninė mova; 3 – išorinis vamzdis; 4 – vidinis vamzdis; 7 – izoliatorius; 8 – kronšteinas; 9 – koaksialinė jungė; b) 1, 5 – guminis žiedas; 2, 7 – neloninė mova; 3 – išorinis vamzdis; 4 – izoliatorius; 6 – vidinis vamzdis; 8 – etaloninis elementas; 9 – kronšteinas; 10 – koaksialinė jungė

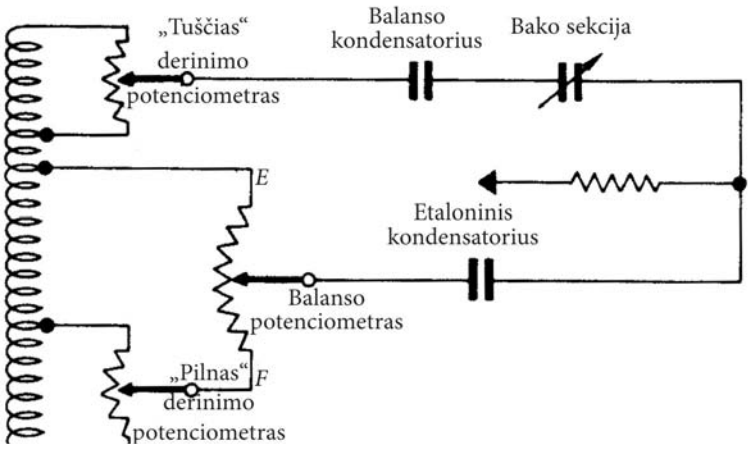


3.4.15 pav. „Netiesinis“ kuro bakas

Jungiant tipinius daviklius A, B ir C, lygiagrečiai gaunama sistema su netiesine rodmenų skale. Siekiant to išvengti, gaminami specialūs profiliuoti davikliai (3.4.3 pav.) su skirtinga išilgine talpa, kintančia pagal reikiamą funkciją. Reikiamas efektas pasiekiamas keičiant antrinio elektrodo skersmenį arba jo laidų paviršių išilgai vamzdelio, kad atitiktų bako formą.

Būsenų „Tuščias“ ir „Pilnas“ reguliavimas. Siekiant pilnai išnaudoti matmenų rodiklio skalę pagal tuščio ir pilno bako parodymų sąlygas, prietaiso ir daviklių kalibravimo metu, reikia atitinkamai subalansuoti sroves ir įtampas schemos matavimo ir balansavimo kontūruose. Tuo tikslu į kuro kiekio matavimo schemos grandinę įjungiami du rankiniu būdu valdomi potenciometrai, kaip tai parodyta 3.4.16 pav.

Derinimo potenciometrai „Tuščias“ ir „Pilnas“ jungiami prie priešingų maitinimo transformatoriaus antrinės apvijos galų – pirmasis į matavimų, o antrasis – į balansavimo kontūrus. Potenciomero „Tuščias“ šliaužiklis sujungiamas su matavimo davikliu per balansavimo kondensatorių, o poteciometro „Pilnas“ šliaužiklis – su vienu balansavimo potenciometro gnybtu. Tokių būdu derinimo potenciometras „Tuščias“ įjungiamas nuosekliai su talpinio daviklio talpa ir gali reguliuoti kontūro A srovę I_S, o potenciometras „Pilnas“ įjungiamas nuosekliai su balanso potenciometro dalimi – kontūro B srovę I_B.



3.4.16 pav. Bako būsenos: „Tuščias“ ir „Pilnas“ nustatymai

Nors bakas tuščias, dėl egzistuojančios matavimų daviklio parazitinės talpos, jo grandinėje tekės nedidelė srovė I_S nors balansavimo potenciometras ir su juo susieta matmenų rodyklė rodys, kad bakas tuščias. Ši srovė sukels nedidelį prietaiso disbalansą, kuriam eliminuoti yra skirti derinimo porenciometrai. Paeiliui reguliuojant derinimo potenciometrus, prietaiso matmenų rodyklė sutapdinama su žyme „Tuščias“ ir, esant pilnam bakui, su žyme „Pilnas“.

Išskyrus minėtuosius rodiklio mojaus reguliatorius, į kuro kiekio matavimo sistemas jungiamos prietaiso ***testavimo ir gedimų fiksavimo*** grandinės, kurių paskirtis – informuoti pilotą apie atliekamų matavimų patikimumą: pirmuoju atveju – įvedant į matavimo sistemą testuojantį signalą ir stebint sistemos reakciją į jį; antruoju – dubliuojant dalį matavimo grandinės.

Kuro kiekį sumuojantieji indikatoriai. Kai kurių civilinės aviacijos orlaivių kuro kiekio matavimo sistemose naudojamas papildomas kuro sąnaudų rodiklis, vadinamasis „kuro sumatorius“. Šio prietaiso tipinis pavyzdys pateiktas 3.4.17 pav.

3.4.17 pav. Sumuojantis kuro rodiklis

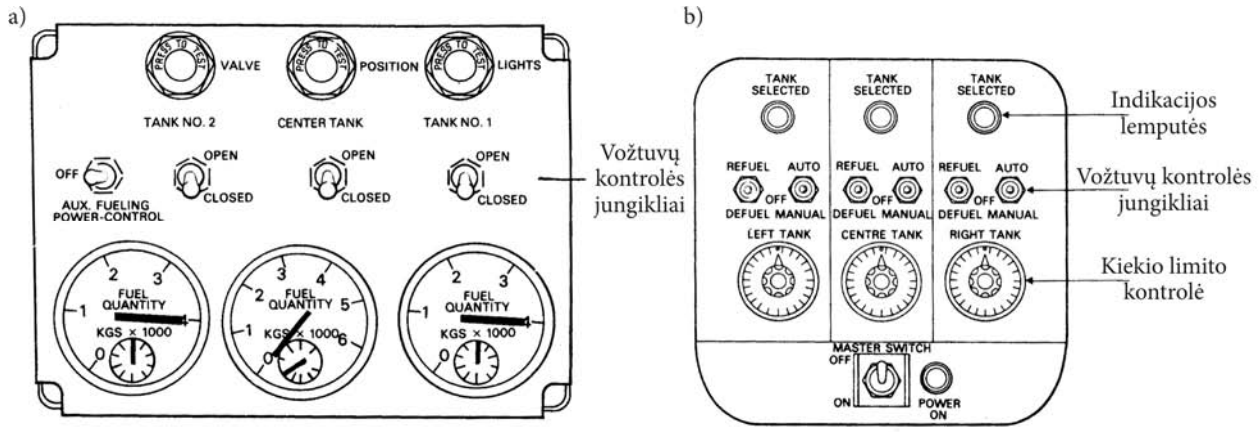
Tokio kuro rodiklio skaitikliai rodo ne tik bendrąjį bakuose likusio kuro kiekį, bet ir bendrąjį orlaivio svorį. Rodiklis sujungtas su orlaivio kuro talpyklių pirminiais kuro kiekio matuokliais ir sumuoja iš matavimo sistemos perduotus signalų elementus. Remiants sumariniu signalu, nustatomas bendrasis orlaivyje sunaudoto kuro kiekis, kuris ir atvaizduojamas atitinkamu sumuojančio kuro rodiklio skaitliuko vaizduokliu. Orlaivio svorio skaitiklis pagal pirminius duomenys nustato ir rodo orlaivio svorio kitimą skrydžio metu.

Pilno tūrio išjungimo sistemos. Kai kuriuose orlaiviuose įrengiamos vadinamosios pilno tūrio išjungimo sistemos (*volumetric top-off – VTO*), kurių paskirtis yra sekti kuro pripildymo į bakus procesą ir, pasiekus nustatytą kuro lygį, įvertinantį šiluminio plėtimosi galimybes, automatizuotai nutraukti jo tiekimą ir signalizuoti apie tai. Šiam tikslui kiekviename bake papildomai įtaisomi talpiniai kuro lygio rodikliai

(3.4.10 pav.), kurie kuro tiekimo į bakus metu seka kintantį kuro lygį, o jų signalai nuolat lyginami *VTO* sistemoje su „pilno bako“ signalu. Kurui pasiekus nustatytą lygį, *VTO* sistemos sulyginimo schema inicijuoja kuro tiekimo sklendžių uždarymą.

Kuro papildymo kontrolės skydai. Dideliame orlaivyje kuro kiekio indikatorių išdėstymas yra pakankamai toli nuo kuro pildymo į bakus įvadų, kas apsunkina aptarnaujančiojo personalo galimybes stebėti kuro kiekį pildymo proceso metu pagal orlaivio rodiklius. Šiai problemai išspręsti šalia kuro pildymo įvadų įrengiami specialūs kuro pildymo į orlaivio bakus kontrolės skydai (3.4.18 pav.).

Tokių skydų prietaisai sujungiami su *VTO* sistema ir pagal norimą ar pilno bako užpildymo lygį reguliuoja kuro pylimo procesą. Skyde (3.4.18 pav., a) norimas kuro lygis stebimas vizualiai ir kuro tiekimas stabdomas rankiniu būdu perjungiant reikiamus jungiklius skydo panelėje. Modernizuotame skyde (3.4.18 pav., b) tai atliekama automatizuotai pagal turimą kuro kiekio limitą, nustatomą atskirai kiekvienam bakui specialiomis lygio rodiklių rankenėlėmis.



3.4.18 pav. Kuro pildymo į bakus kontrolės skydai

Baigus kuro pildymo procesą, kontrolės skydai uždaromi durelėmis ir tada specialus jungiklis išjungia kuro pildymo sistemos elektrinius elementus.

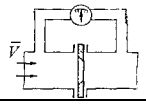
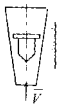
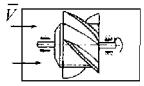
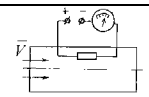
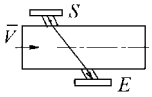
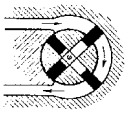
3.4.4. Kuro sąnaudų matavimo metodai

Kuro sąnaudos (debitas) nustatomos pagal kuro kiekį, pratekantį žinomo skerspjūvio kanalu per laiko vienetą. Kuro sunaudojimas yra vienas iš parametrų, nuo kurio priklauso variklio trauka. Skrydžių metu kuro sąnaudų matavimai turi būti atliekami pakankamai tiksliai: $\leq \pm 2$ %.

Kuro sąnaudos skaičiuojamos ***tūrio vienetais per laiką***, matuojamą sekundėmis, minutėmis, valandomis (pavyzdžiui, m^3/s, m^3/min, $m^3/val.$) arba masės vienetais per laiko vienetą (kg/s, kg/min, kg/val.). Tūrinės kuro sąnaudos žymimos simboliu Q, o kuro masės sąnaudos – simboliu Q_m. Kuro sąnaudos matuojamos, tekant kurui per kuro tiekimo kanalą, visą laiką nuo variklio paleidimo iki jo sustabdymo. Tokios kuro sąnaudos vadinamos ***suminėmis arba integruotomis*** ir žymimos simboliu *G*. Taip pat egzistuoja momentinės (valandinės) kuro sąnaudos, t. y. sąnaudos per tam tikrą laiko intervalą. Prietaisai, kuriais matuojamos kuro sąnaudos, vadinami ***kuro debitmetrais***. Prietaisai, kurie matuoja kuro kiekį, tekantį per tiekimo vamzdyną variklio darbo metu, vadinami ***kuro sąnaudų skaitikliais***.

3.4 lentelėje pateikti dažniausiai paplitę kuro sąnaudų matavimo metodai ir suprastintos realizavimo principinės schemos.

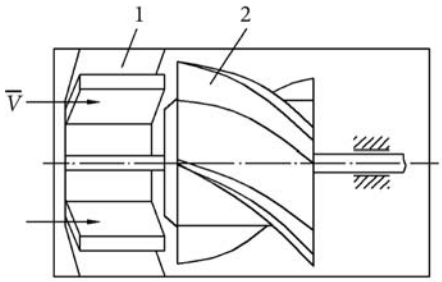
3.4 lentelė. Kuro sąnaudų matavimo metodai

Metodas	Veikimo principas	Principinė schema
Slėgio kritimo	Priklausomybė tarp debito ir slėgio kritimo, sudaromo vamzdyje įstatytu nejudamu įtaisu	
Aptekėjimo	Kūno, kurį apteka srautas, poslinkis dėl jį veikiančio dinaminio slėgio, kintant debitui	
Turbininis	Debito priklausomybė nuo vamzdyje įstatytos turbinės sukimosi dažnio	
Termomanometrinis	Nepertraukiamai šildomo kūno, panardino į kuro srautą, temperatūros ir kuro debito priklausomybė	
Ultragarsinis	Pratekančio kuro tūrio matavimas pagal ultragarso greitį žinomo skersmens sraute	
Tachometrinis	Kuro tūrio priklausomybė nuo judamojo elemento, esančio sraute, sukimosi dažnio	

Dažniausiai paplitę slėgio kitimo ir turbininiai kuro kiekio skaitikliai ir kuro debitmačiai.

3.4.5. Turbininis kuro sąnaudų keitiklis

Turbininis kuro sąnaudų keitiklis sudarytas iš kuro srovės nukreipimo įtaiso *1* (3.4.19 pav.) ir hidraulinės sparnuotės *2*, kurios sukimosi ašis lygiagreti su srauto kryptimi. Sparnuotės mentės išlenktos kampu ašies atžvilgiu.



3.4.19 pav. Turbininis kuro sąnaudų keitiklis:
1 – srovės nukreipimo įtaisas; 2 – sparnuotė

Neapkrautos sparnuotės sukimosi dažnis n proporcingas tekančio pro ją kuro srauto greičiui V:

$$n = kV, \tag{3.17}$$

čia k – proporcingumo koeficientas, priklausantis nuo sparnuotės konstrukcijos.

Kadangi kuro sąnaudos per vamzdyną, kurio skerspjūvio plotas S, priklauso nuo kuro tekėjimo greičio, tai:

$$V = \frac{Q}{S}. \tag{3.18}$$

Įrašę (3.17.) į (3.18), gausime:

$$n = \frac{k}{S}\mathrm{Q}\,. \tag{3.19}$$

Iš (3.19) lygties matyti, kad sparnuotės sukimosi dažnis proporcingas tūriniam kuro sunaudojimui. Kadangi dažniausiai matuojamas masės debitas Q_m, tai, įvertinus ryšį tarp Q ir Q_m, (3.19) lygtį galima pateikti taip:

$$n = \frac{k}{\rho \cdot S}\mathrm{Q}_m\,, \tag{3.20}$$

čia ρ – kuro tankis.

(3.20) lygtis yra neapkrauto kuro sąnaudų turbininio keitiklio statinė charakteristika. Reali statinė keitiklio charakteristika šiek tiek skiriasi nuo (3.20) išraiškos. Tai priklauso nuo trinties sparnuotės guoliuose ir priešingo veikimo momentų, kuriuos sukelia už sparnuotės esantys mechaniniai elementai, apkraunantys sparnuotę. Tačiau debitmetrams analizuoti šios formulės pakanka.

Kuro kiekis, sunaudojamas variklio darbo metu, bus:

$$G_m = \int_0^t \mathrm{Q}_m\, dt\,, \tag{3.21}$$

čia *t* – variklio darbo laikas nuo jo paleidimo iki sustabdymo.

Integruodami kairę ir dešinę (3.20) lygties puses per laiko intervalą nuo 0 iki *t*, gausime:

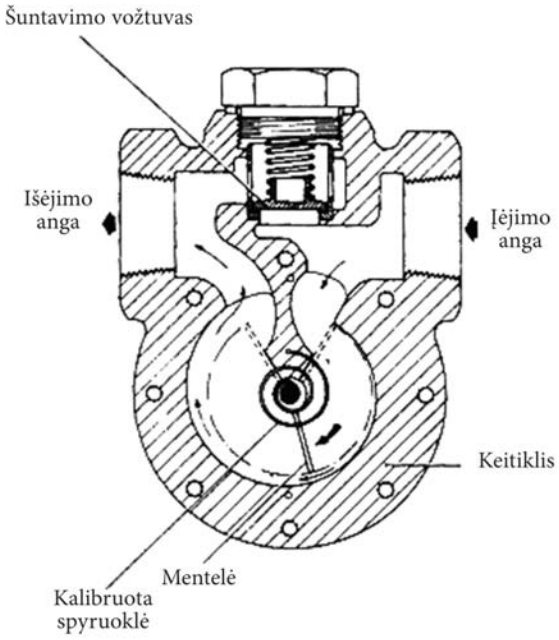
$$\varphi = \frac{k}{\rho \cdot S}\int_0^t \mathrm{Q}_m\, dt = \frac{k}{\rho \cdot S}G_m\,, \tag{3.22}$$

čia $\varphi = \int_0^t n \cdot dt$ – sparnuotės posūkio kampas.

Taigi matuodami bendrą sparnuotės sūkių skaičių (o ne jos dažnį) gausime kuro kiekio skaitiklį.

3.4.6. Kuro kiekio skaitikliai

Atskirų kuro sąnaudų skaitiklių realizacijai gali būti taikomi paprastesni už turbininius (3.4.19 pav.) slėginiai kuro srauto greičio davikliai su vadinamąja pasukama mentele. Tokio daviklio tipinis pavyzdys pateiktas 3.4.20 pav.



3.4.20 pav. Pasukamosios mentelės kuro srauto greičio daviklio skersinio pjūvio vaizdas

Daviklis turi lengvo lydinio metalinį korpusą su dviem – kuro įėjimo ir išėjimo angomis. Keitiklio viduje yra du srauto tekėjimo kanalai: žiedinis, sraigės pavidalo, srauto matavimo kanalas ir tiesioginis, šuntavimo kanalas. Sraigės pavidalo matavimo kanale įtaisyta pasukamoji mentelė srautui tekant, reaguojanti į pratekančio kuro srauto slėgį. Mentelės sukimosi ašis susieta su kalibruota žiedine spyruokle, sukeliančia atstojamąjį jėgos momentą, pasipriešinantį kuro slėgio jėgos momentui, veikiančiam mentelę, proporcingai pratekančio kuro srauto greičiui.

Specialiai suprojektuotas daviklio matavimo kanalo sraigės pavidalo profilis ir pasukamosios mentelės įtaisymas kanale taip, kad jai pasisukant tarp jos galo ir išorinės kanalo sienelės esantis tarpas keistųsi pagal nustatytą priklausomybę, sudaro sąlygas matuoti pratekančio pro daviklį kuro sąnaudų srauto greitį. Tai atliekama, sujungiant kalibruotos pasipriešinimo spyruoklės ašį su kuro sąnaudų skaitiklio rodikliu.

Kuro sąnaudų rodiklyje mentelės ir kalibruotos spyruoklės ašies posūkis gali būti keičiamas į elektrinį signalą, valdantį duomenų nuskaitymo rodyklę, pavyzdžiui, įtaisant ant ašies dviejų polių pastovųjį strypo pavidalo magnetą, kuris yra sukamas nejudamojo žiedinio elektromagneto viduje. Tokia duomenų perdavimo rodikliui sistema neturi matavimus trikdančio inercinio pasipriešinimo ir gali būti naudojama tolesniam nuotoliniam duomenų perdavimui. Kuro sąnaudų skaitiklio rodiklio skalė graduojama sunaudojamo kuro kilogramais (galonais) per valandą.

Tokiu atveju, kai tekančio per kuro sąnaudų skaitiklį kuro srauto greitis viršija nustatytą maksimalaus greičio ribą, veikiantis posūkio mentelę slėgis prispaudžia mentelę prie įtaisytos matavimo kameroje šuntavimo sklendės, suveikia neleistinojo slėgio šuntavimo vožtuvas, atpalaiduojantis sklendę, nutraukiančią kuro srauto tekėjimą per matavimo kamerą ir nukreipiančią jį per šuntavimo kanalą tiesiogiai, aplenkiant matavimo sistemą. Sumažėjus pertekliniam tiekiamo kuro slėgiui, sistema sugrįžta į pirmykštę darbinę būseną.

Tiekiamo kuro perteklinio slėgio dydžio riba gali būti reguliuojama šuntavimo vožtuvo prispaudimo spyruokle (3.4.20 pav.).

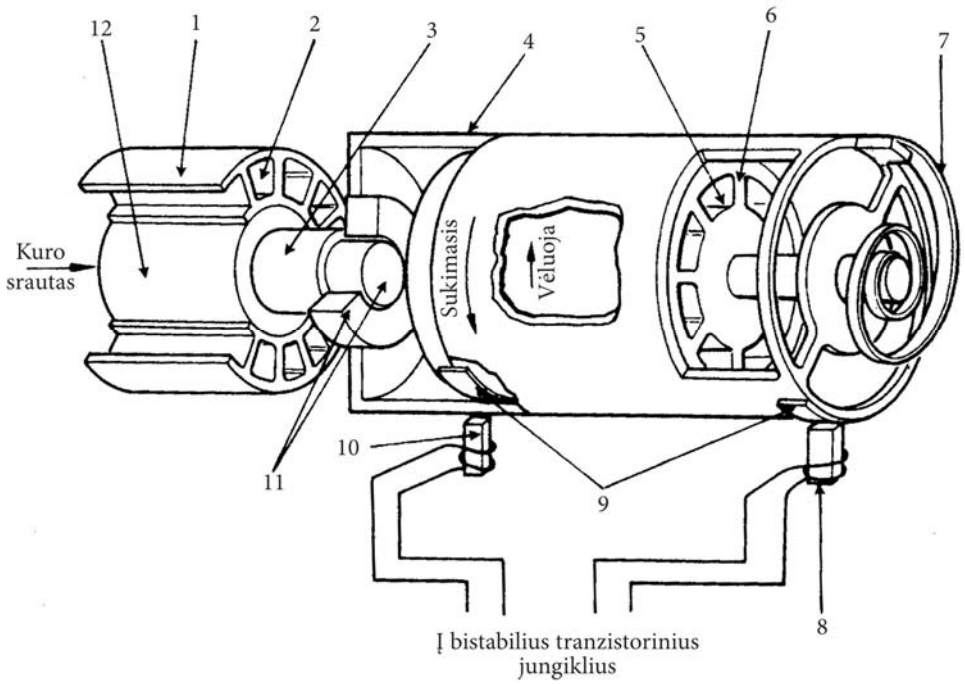
3.4.7. Integruojančiosios kuro sąnaudų matavimo sistemos

Integruojančiųjų kuro sąnaudų matavimo sistemų pagrindiniu požymiu yra tai, kad jomis nustatomos ne tik momentinės, bet ir suminės kuro sąnaudos (debitas) per nustatytą laiko intervalą (pavyzdžiui, variklio veikimo laiką), t. y. integruotosios laiko intervale kuro sąnaudos ((3.21) išraiška). Paprastai tokiose sistemose numatomi du matavimo kanalai: integruojančiojo debitmetro ir kiekio skaitiklio. Sistema sudaroma iš trijų pagrindinių struktūrinių elementų: kuro sąnaudų transmisijos mazgo, elektroninės matavimų schemos arba kompiuterio ir kompleksinio matavimo rezultatų indikatoriaus.

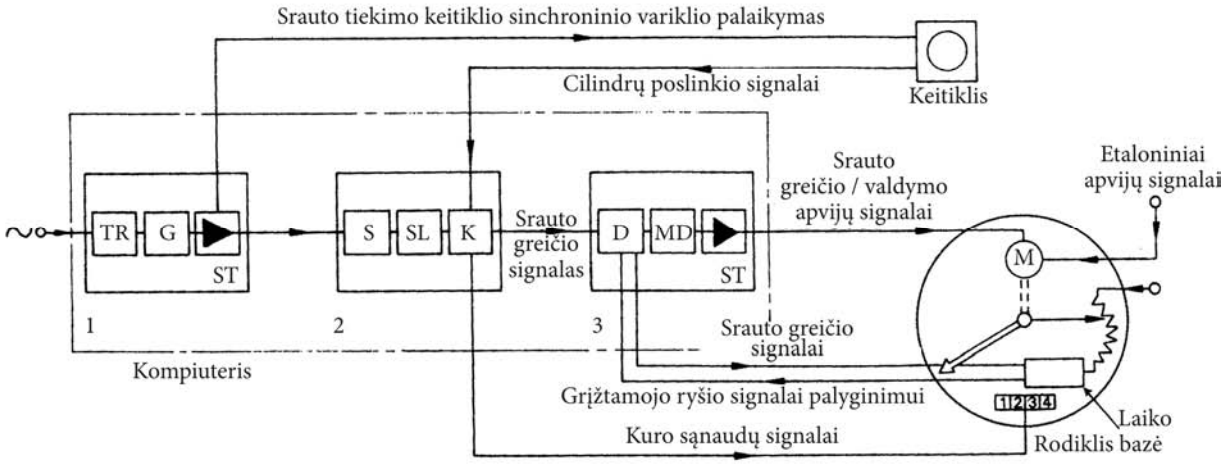
Matavimams gali būti naudojamas turbininio tipo (3.4.19 pav.) kuro sąnaudų keitiklis, kai jo sparnuotės sukimosi kampinis greitis arba sūkių dažnis matuojami magnetoindukciniu principu. Tačiau geresnių rezultatų pasiekiama diferencine matavimo sistema, kurios kuro tiekimo ir sąnaudų matavimo mazgo, toliau vadinamo ***transmisijos mazgu***, konstrukcinės sandaros schema pavaizduota 3.4.21 pav.

Į kuro transmisijos mazgą įeina sinchroniniu varikliu varoma kuro sąnaudų tiekimo turbina *1*, kurios velenas *3* per magnetinę žeminančiąją pavarą *11* sujungiamas su sąnaudų matavimo kameros lengvojo lydinio išoriniu cilindru *4*. Šio cilindro viduje įtaisyta tekančio kuro srauto sukama vidinio cilindro sparnuotė *6,* kurios velenas susietas su išorinių cilindru *4* per kalibruotą tiesinę spyruoklę *7*, perduodančią turbinos *1* sukimo momentą vidinio cilindro velenui. Ant išorinio ir vidinio cilindrų pritvirtinti nuolatinai magnetai *9*, priešais kuriuos sumontuoti magnetoindukciniai elektrinių signalų davikliai *8* ir *10*.

Nusistovėjus tiekiamam per transmisijos mazgą kuro srautui, išorinio cilindro *4* ir vidinio cilindro sparnuotės *6* sūkių dažnis tampa vienodas ir lygus sinchroninio variklio rotoriaus *12*, sukančio turbinos veleną *3*, sūkių dažniui. Tačiau dėl pratekančio kuro masės inercijos įtakos atsiranda ***priešingas*** sukimosi krypčiai ir proporcingas kuro masei (svoriui) ***jėgos momentas***. Dėl to tarp besisukančių vienodu kampiniu greičiu išorinio ir vidinio cilindrų atsiranda fazinis poslinkis $\Delta\varphi$, proporcingas matuojamojo kuro sąnaudų masės kitimo greičiui, kalibruojamas cilindrus jungiančia tiesine spyruokle *7*.



3.4.21 pav. Integruojančiojo sąnaudų matuoklio kuro transmisijos mazgas: 1 – turbina; 2, 5 – kuro srauto nukreipimo angos; 3 – turbinos velenas; 4 – išorinis cilindras; 6 – rotorius; 7 – tiesinė spyruoklė; 8, 10 – elektrinių signalų nuskaitymo magneto-indukciniai davikliai; 9 – magnetai; 11 – magnetinė mova (jungtis); 12 – rotorius



3.4.22 pav. Integruojančiosios sąnaudų matavimo sistemos blokinė schema

Kai kuras neteka per matavimo sistemą, priešais esantys abiejų cilindrų magnetai yra vienoje linijoje, tačiau nedidelis kapinis skirtumas yra, ir tai matyti 3.4.23 pav., a. Kurui tekant pro matavimo sistemą pastoviu greičiu, tarp besisukančių cilindrų susidaro pastovusis kampas $\theta = \Delta\varphi$ (3.4.23 pav., b), o kai kuras juda didžiausiu greičiu, fazių poslinkio kampas tampa maksimalus (3.4.23 pav., c).

Siekiant nustatyti kuro sąnaudų srauto greitį atitinkantį dydį, nuo sinchroniškai besisukančių matavimo mazgo cilindrų kiekvieno sukimosi periodo metu, atitinkamiems nuolatiniams magnetams praeinant pro magnetoindukcinius keitiklius, nuskaitomi elektriniai impulsai, kurie perduodami apdoroti į elektroninę matavimų schemą 3.4.22 pav.

Elektroninę matavimų schemą sudaro trys sekcijos:

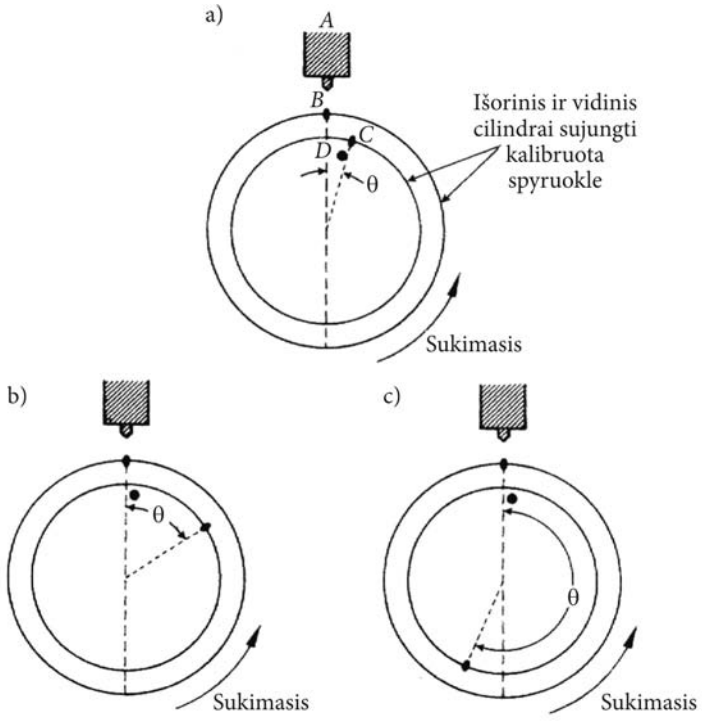
– pirmoji (1) – energijos tiekimo, kuri kontroliuoja maitinimo šaltinius, palaikančius kuro tiekimo sinchroninio variklio ir elektroninių įrenginių funkcionavimą. Į šią sekciją įeina maitinimo transformatorius (TR), generatorius (G) ir stiprintuvas (ST);

– antroji (2) – matavimo signalų paskirstymo sekcija. Į ją įeina selektorius (S), sulyginimo schema (SL) ir komutatorius (K);
– trečioji (3) – rodmenų formavimo sekcija. Ją sudaro detektorius (D), moduliatorius (MD) ir stiprintuvas (ST).

Kompleksinį matavimo duomenų indikatorių sudaro ***kuro masės (svorio)*** suminių kuro sąnaudų per nustatytą laiką rodytuvas ir kuro ***kiekio skaitiklio*** rodytuvas.

Integralinių kuro sąnaudų indikatoriaus rodyklės nustatymas valdomas dviejų fazių servovarikliu, kurio viena fazė maitinama atraminiu 400 Hz dažniu, o į kitą fazę iš sekcijos (3) tiekiamas valdymo signalas, atitinkantis kuro sąnaudų srauto matuojamo greičio dydį, nustatomą pagal matavimo mazgo vidinio ir išorinio diskų sukimosi fazės poslinkį. Šiam tikslui nuo matavimo mazgo cilindrų nuimamų impulsų laikinis poslinkis Δt keičiamas į jį atitinkančią variklio valdymo įtampą. Integralinėms kuro sąnaudoms nustatyti vaizduoklio sekcijoje yra laiko daviklis, kurio signalai tiekiami į elektroninės matavimo schemos trečiąją duomenų apdorojimo sekciją ir panaudojami kuro sąnaudoms integruoti laike.

Kuro skaitiklio duomenų rodiklis valdomas impulsais, tiekiamais iš sinchroniškai su turbina besisukančių diskų daviklių, skaičiuoja sparnuotės sūkių skaičių. Skaitiklio nuliui nustatyti ranka paspaudžiamas mygtukas.



3.4.23 pav. Matavimų rodyklės valdymas: (a) – nulinis kuro srautas: A – dvi ritės (viena už kitos); B, C – magnetai; D – stabdymas (suteikia 3°, 5° nuokrypį), vėlavimo kampas θ, kuriuo pasislinkę abu būgnai sukasi kartu; (b) – judantis kuro srautas; (c) – judančio kuro srauto greitis

Jei prieš paledžiant variklį impulsų skaitiklio būgneliai rankiniu būdu nustatomi į padėtį, atitinkančią ***užpildyto*** kuro kiekį $G_{m0,}$ kilogramais, variklio darbo metu kuro kiekio skaitiklio rodmenys mažėja. Skaitiklis rodo, kiek ***kuro liko*** orlaivio bakuose, t. y. kuro likutį, o ne jo sąnaudas. Vadinasi, skaitiklis realizuoja šį algoritmą:

$$G_m = G_{m0} - \left[\frac{N}{n} + \sum_{i=1}^{m} \Delta V \left(\rho_i + \rho_S \right) \right], \tag{3.23}$$

čia N – įtampos impulsų skaičius, patenkantis iš keitiklio į skaitiklio elektromagnetą; n – apskaičiuotas impulsų skaičius, atitinkantis 1 kg kuro, kurio tankis yra 0,8 kg/cm^3; ΔV – kuro tūris, kuriam daroma pataisa; ρ_i, ρ_S – tikroji ir apskaičiuotoji (0,8 kg/cm^3) kuro tankio reikšmės; m – pataisų kiekis, įvestas kuro kiekio skaitiklio darbo metu.

Kuro tankio pakitimai sukelia reikšmingas papildomas matavimų paklaidas. Joms sumažinti tolimųjų magistralių orlaiviuose naudojamos kuro sąnaudų matavimo sistemos su kuro tankio korekcija. Šiam tikslui į kuro sąnaudų matavimo sistemą įvedamas papildomas kuro tankio matavimo kanalas. Einamoji kuro tankio reikšmė nustatoma specialiu kuro tiekimo vamzdyne įtaisytu kondensatoriumi C_X.

Santykinė kuro debitmetro paklaida yra ±(2–3) %, o kiekio skaitiklio – ±2,5 %. Prietaisuose su kuro tankio kitimo kompensacija santykinė abiejų kanalų matavimo paklaida neviršija ±2 % .

3.4.8. Kuro debitmetrų ir skaitiklių paklaidos

Kadangi kuro debitmetruose ir skaitikliuose naudojami vienodi turbininiai keitikliai, vienodos yra ir metodinės paklaidos.

Jas lemia:

– keitiklio turbinos apkrovos nepastovumai, sukeliami kuro klampumo pokyčių, guolių trinties ir keitiklių perdavimo reakcijos;
– kuro tankio reikšmės kitimas arba nevisiško jo kitimo korekcijos;
– netolygaus kuro srauto greičio pasiskirstymas keitiklio skerspjūvyje.

Paskutinės metodinės paklaidos atsiradimo priežasties galima išvengti, sudarant sąlygas, kad kuro srautas turbinos buvimo vietoje būtų laminarinis. Tam tikslui prieš turbiną ir už jos įstatomos čiurkšlę nukreipiančios briaunelės.

Eksploatavimo metu dėl tarpinių keitiklių geometrinių dydžių pakitimų ir elektrinių schemų parametrų pokyčių atsiranda papildomų vadinamųjų prietaiso matavimų paklaidų. Norint sumažinti paklaidas daromos periodinės prietaisų patikros atliekant techninę priežiūrą.

3.5. Vibrometrai

3.5.1. Paskirtis ir matuojamieji parametrai

Vibrometrai – tai aviaciniai prietaisai, kurie skirti:

– matuoti orlaivio variklių vibracijų amplitudėms, greičiams ir pagreičiams;
– pateikti matavimo rezultatams indikatoriuose (vibracijų rodytuvuose);
– signalizuoti apie leistinųjų vibracijų parametrų dydžių ribų viršijimą šviesos signalu;
– perduoti matavimo rezultatams elektrinio signalo pavidalu į orlaivio duomenų registravimo aparatūrą.

Vienas iš svarbiausių parametrų, nusakančių aviacinių variklių techninį būvį, yra vibracijos. Vibracijos atsiranda dėl neišbalansuotų išcentrinių jėgų, susidarančių dėl variklio dalių disbalansų. Didėjant detalių nusidėvėjimui, didėja vibracijos. Aviacinio variklio vibracijos, sukeliamos periodinių išcentrinių jėgų, turi harmoninį pobūdį:

$$s = S\sin wt\,, \tag{3.24}$$

čia s, S – atitinkamai einamoji ir amplitudinė vibracinių poslinkių (deformacijų) reikšmės; w – vibracijų kampinis dažnis.

Vibracijos apibūdinamos dažnio f vibracinių deformacijų amplitude S, vibracijų greičiu V ir vibracijų pagreičiu a_V arba vibracine perkrova n_V. Šie parametrai susiję tarpusavyje:

$$V = \dot{s} = Sw\cos nt\,;\; a_V = \ddot{s} = -Sw^2\sin wt\,;\; n_V = \frac{a_V}{g} = \frac{f^2 S}{250}\,, \tag{3.25}$$

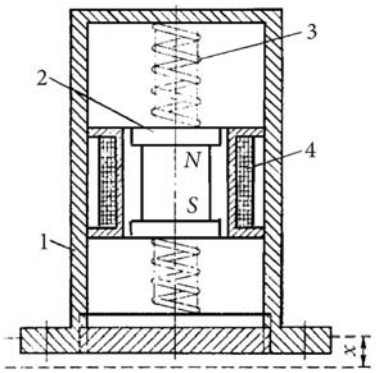
čia g – laisvojo kritimo pagreitis.

Vibracinės deformacijos matuojamos vibrometrais, vibracijų greitis – greičio vibrometrais, vibracijų pagreitis – pagreičio vibrometrais. Paskutinieji du vibrometrų tipai aviacijoje vadinami vibracijų kontrolės aparatūra.

3.5.2. Vibrometro keitiklis ir matavimų principas

Aviaciniuose vibrometruose taikomas inercinis metodas, leidžiantis matuoti objekto vibracijas, kurios stangriai sujungtos su objektu masės atžvilgiu.

Šiuo atveju vibracijų parametrų matavimo keitiklis (toliau – vibracinis keitiklis) (3.5.1 pav.) sudarytas iš korpuso *1* (vibruojančiojo elemento), sujungto spyruokle *3* su inertiškąja mase – magnetu *2* (nevibruojančiuoju elementu) ir magneto-indukcinio elemento *4*, kuris sukelia elektrinius signalus, proporcingus matuojamoms vibracijoms.



3.5.1 pav. Vibracinis keitiklis: 1 – korpusas; 2 – inertiškoji masė; 3 – spyruoklė; 4 – magnetoindukcinis keitiklis

Vibracinio keitiklio įėjimo parametras – tai jo korpuso *1* poslinkis inercinės erdvės atžvilgiu, išėjimo parametras – korpuso poslinkis *x* magneto *2* (inertiškosios masės) atžvilgiu (3.4.23 pav.).

Tokios sistemos judesys aprašomas lygtimi:

$$\ddot{x} + 2dw_0\dot{x} + w_0^2 x = \ddot{S}, \tag{3.26}$$

čia $w_0 = \sqrt{\frac{C}{m}}$ – savasis kampinis dažnis; C – spyruoklės standumas; m – magneto masė; $d = \frac{k}{2\sqrt{Cm}}$ – santykinio slopinimo koeficientas; k – slopinimo koeficientas.

Vibracinio keitiklio amplitudinę-dažninę charakteristiką (ADCh) aprašo lygtis:

$$\dot{\lambda} = \frac{\gamma^2}{\sqrt{\left(1-\gamma^2\right)^2 + 4d^2\gamma^2}}, \tag{3.27}$$

čia $\lambda = \frac{\dot{x}}{x_{\max}}$ – santykinė vibracijų amplitudė; $\gamma = \frac{w}{w_0}$.

3.5.2 pav. pateikta ADCh, esant skirtingiems virpesių slopinimo koeficientams *d*.

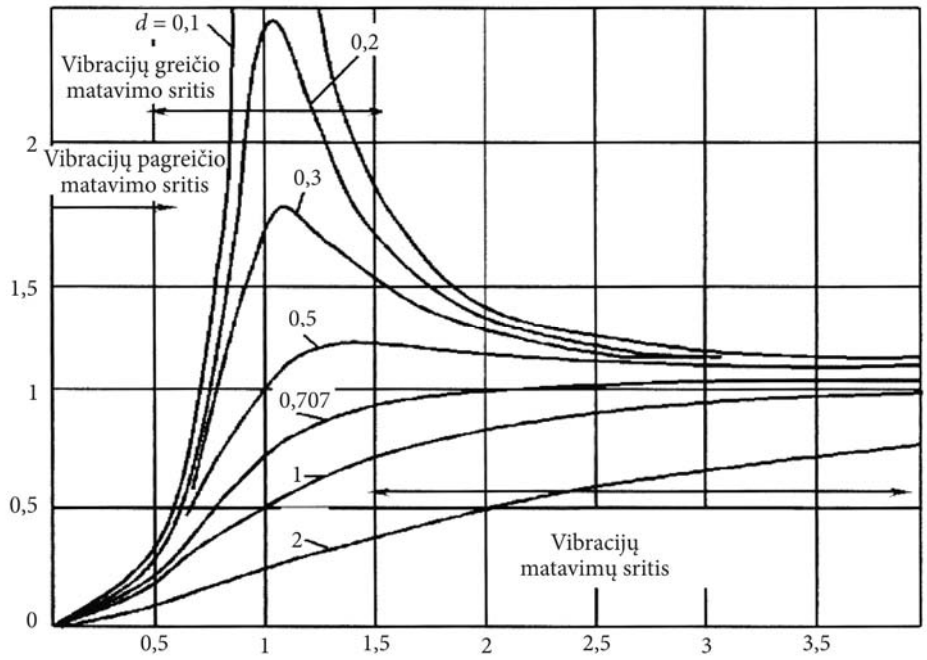
Iš vibracinio keitiklio ADCh matyti, kad esant vibracijų santykiniam dažniui $\gamma >> 1$ keitiklio jautrumas artėja prie vieneto. Sakoma, kad tokiu atveju vibracinis keitiklis veikia vibracijų amplitudės matavimų režimu. Kad ši sąlyga būtų išlaikoma, būtina vibracinio keitiklio konstrukcijoje naudoti mažo standumo spyruoklę. Jei $\gamma < 0{,}5$, tai vibracinis keitiklis veikia vibracijų pagreičio matavimo režimu. Šiuo atveju spyruoklė turi būti pakankamai standi. Kai $0{,}5 < \gamma < 1{,}5$, keitiklis matuoja vibracijų greitį. Paprastai aviaciniuose vibraciniuose keitikliuose savieji virpesių dažniai yra gerokai mažesni už priverstinius virpesių dažnius, t. y. $\gamma >> 1$.

Kadangi keitiklio magneto-indukcinis elementas atlieka diferencijavimo funkciją, tai EVJ jo išėjime priklauso nuo vibracijų greičio. Esant harmoninėms vibracijoms egzistuoja tarpusavio ryšys tarp greičio ir

pagreičio, todėl matuojant vibracijas, esant fiksuotam dažniui, galima tarti, kad magnetoindukcinio keitiklio išėjime atsirandanti EVJ yra proporcinga vibracijų pagreičiui.

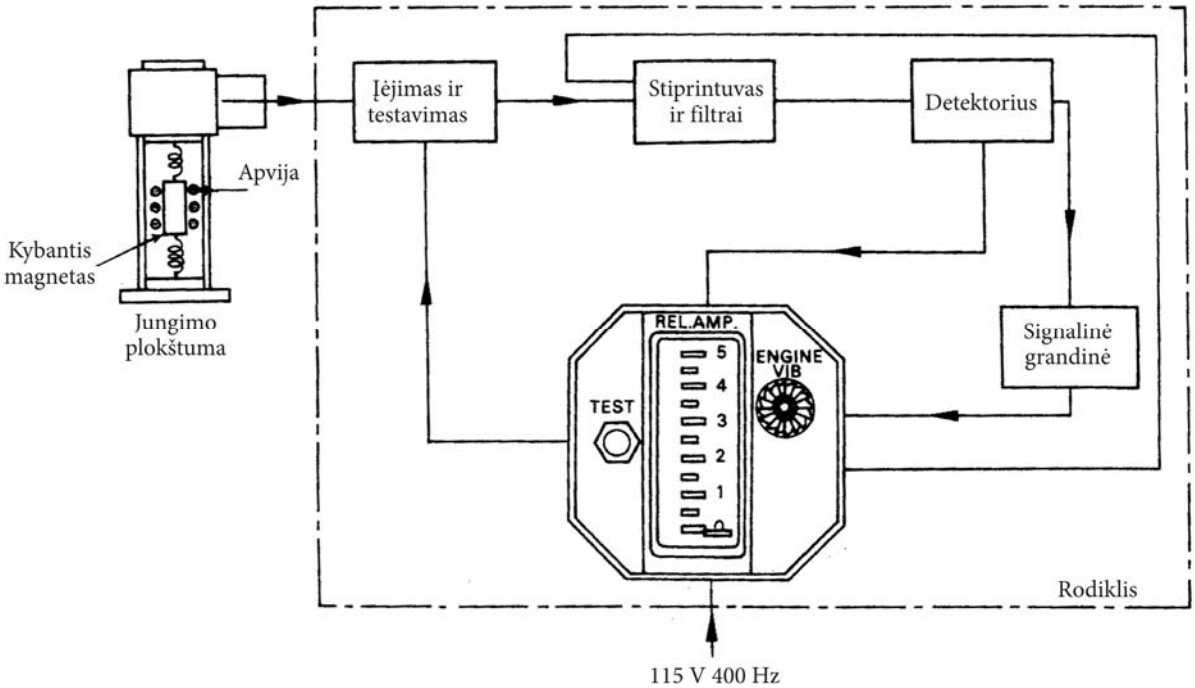
Turbosraigtiniai aviaciniai varikliai iš esmės dirba esant pastoviam veleno sūkių dažniui, jų vibracijų dažnis irgi pastovus, o vibracijų lygio normavimas atliekamas pagal vibracijų pagreičio reikšmę.

Kadangi turboreaktyvinių aviacinių variklių sūkių dažnis keičiasi priklausomai nuo reikiamos traukos apibrėžtame diapazone, tai ir vibracijas tenka kontroliuoti tam tikrų dažnių diapazone bei normuoti jų lygį pagal leistinąją vibracijų greičio reikšmę.



3.5.2 pav. Vibracinio keitiklio amplitudinės-dažninės charakteristikos

Taigi, remiantis pateikta analize, apibendrintą vibracijų matavimo prietaiso principinę schemą galima sudaryti tokiu pavidalu (3.5.3 pav.).



3.5.3 pav. Bendroji vibracijų matavimų schema

Vibracijų keitiklis jungiamas prie matavimo schemos per jungiklį, kuris prietaiso kalibravimo metu (paspaudus mygtuką „TEST“) išjungia keitiklį ir tiekia į schemą nustatytos amplitudės bei dažnio etaloninį signalą. Matavimo schemoje yra nuosekliai sujungti: keičiamosios dažnių pralaidumo juostos stiprintuvas, amplitudės detektorius ir signalinė grandinė, kuri detektoriaus išėjimo įtampą lygina su nustatyta leistinąja įtampa ir, išėjimo įtampai viršijus leistinąją, formuoja įspėjimo garsinį ir šviesinį signalus.

3.5.3. Vibracijų greičio ir pagreičio matavimo prietaisai

Greičio vibrometrai. Tokie prietaisai realizuojami pagal 3.5.4 pav. pateiktą struktūrinę schemą. Greičio vibrometre magneto-indukcinio keitiklio *M* išėjimo įtampa priklauso nuo vibracinio keitiklio perdavimo koeficiento, kuris vibracijų greičiui apskaičiuojamas pagal formulę:

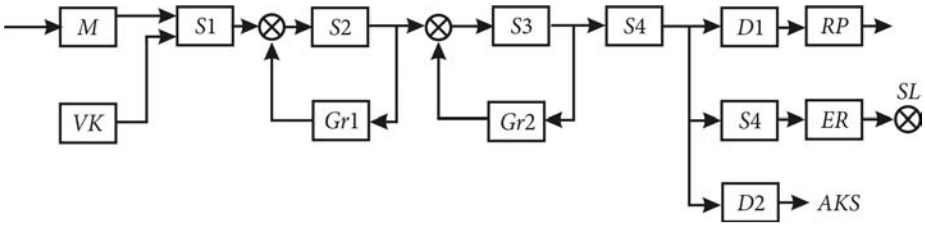
$$K = \frac{1{,}41 \cdot U}{V}\left(\frac{\text{mV}}{\text{mm/s}}\right), \tag{3.28}$$

čia U – išėjimo įtampa (mV); $V = fS$ – vibracijų greitis $\left(\text{mm/s}\right)$; f – vibracijų dažnis (Hz); S – vibracinių poslinkių amplitudė (mm).

Vibracinio keitiklio išėjimo įtampa *U,* sustiprinta stiprintuvu *S1*, turinčiu didelį ir pastovų įėjimo impedansą, toliau stiprinama stiprintuvais *S2* ir *S3*. Šiais stiprintuvais dėl neigiamo ir nuo dažnio priklausomo grįžtamojo ryšio *Gr1* ir *Gr2* sudaroma siaura kelių dešimčių hercų dažnio laidumo juosta. Stiprintuvo *S3* išėjimo signalas, sustiprintas galios stiprintuvu *S4*, patenka į detektorius *D1* ir *D2*.

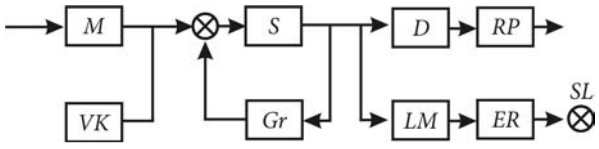
Iš detektoriaus *D1* pastovi įtampa per stiprintuvą *S5* patenka į elektroninę relę *ER*. Kai išėjimo įtampa pasiekia tam tikrą ribinę vibracijų greičio reikšmę, elektroninė relė *ER* įjungia šviesos signalizaciją *SL*.

Rodiklio prietaiso skalė, pagal kurią nustatomas matavimo rezultatas, sugraduojama vibracijų greičio vienetais mm/s, pavyzdžiui, nuo 5 mm/s iki 100 mm/s.



3.5.4 pav. Greičio vibrometro struktūrinė schema: M – magnetoindukcinis keitiklis; S1, S2, S3, S4, S5 – stiprintuvai; D1, D2 – detektoriai; RP – rodiklis; VK – vidinė kontrolė; Gr1, Gr2 – grįžtamasis ryšys; ER – elektroninė relė; SL – signalinė lempa; AKS – automatizuota kontrolės sistema

Pagreičio vibrometrai. Šiuo atveju (3.5.5 pav.) stiprinama magneto-indukcinio keitiklio *M* išėjimo įtampa, turinti vieną ***fiksuotąjį dažnį.*** Todėl stiprintuve *S* neigiamu grįžtamuoju ryšiu *Gr* sudaroma kelių hercų dažnių laidumo juosta.



3.5.5 pav. Pagreičio vibrometro struktūrinė schema: M – magneto-indukcinis keitiklis; S – stiprintuvas; D – detektorius; RP – rodiklis; VK – vidinė kontrolė; Gr – grįžtamasis ryšys; LM – multivibratorius; ER – elektroninė relė; SL – signalinė lempa

Sustiprinta matavimo įtampa iš detektoriaus *D* patenka į rodiklį *RP* ir kartu į multivibratorių *LM*. Multivibratorius *LM* suveikia esant įtampai, atitinkančiai nustatytą ribinį vibracijų pagreičio lygį. Tada elektroninė relė *ER* įjungia šviesos signalizaciją *SL*.

Pagreičio vibrometre rodiklio skalė sugraduota vibracijų pagreičio vienetais nuo 0 g iki 7 g. Paprastai vibrometrai turi vidinės kontrolės įtaisą *VK*, kurį įjungus, vietoje vibracinio keitiklio įtampos į stiprintu-

vus tiekiama nustatyto dažnio įtampa. Jei vibrometras veikia gerai, prietaisas rodo atitinkamą matuojamojo parametro lygį ir suveikia signalizacija.

Pagrindinė aviacinių vibrometrų paklaida darbiniame diapazone neviršija ±10 %. Tačiau prietaisų eksploatacijos procese paklaidos gali keistis dėl magnetoindukcinio keitiklio tvirtinimo sutrikimų. Tokiu atveju gali nesutapti vibracijų kryptis su vibracinio keitiklio ašimi ir atsirasti ***metodinė*** paklaida. Be to, kintant vibracinio keitiklio pastovaus magneto magnetinei indukcijai (senėjimas, temperatūriniai pokyčiai), atsiranda keitiklio jautrumo pokyčių, kurie matyti iš perdavimo koeficiento:

$$k = \frac{E}{S \cdot f} = \frac{1,41U}{S \cdot f}, \tag{3.29}$$

čia $E = 1,41 \cdot U$ – vibracinio keitiklio išėjimo EVJ; S – poslinkių amplitudė; f – vibracijų dažnis.

Vadinamosios prietaiso vibrometrų paklaidos atsiranda didėjant trinčiai vibracinio keitiklio guoliuose ir didėjant slopinimo koeficientui, esant nestabiliam stiprintuvų stiprinimo koeficientui, kintant rodiklio parametrams. Todėl vibrometrai reguliariai techniškai prižiūrimi.

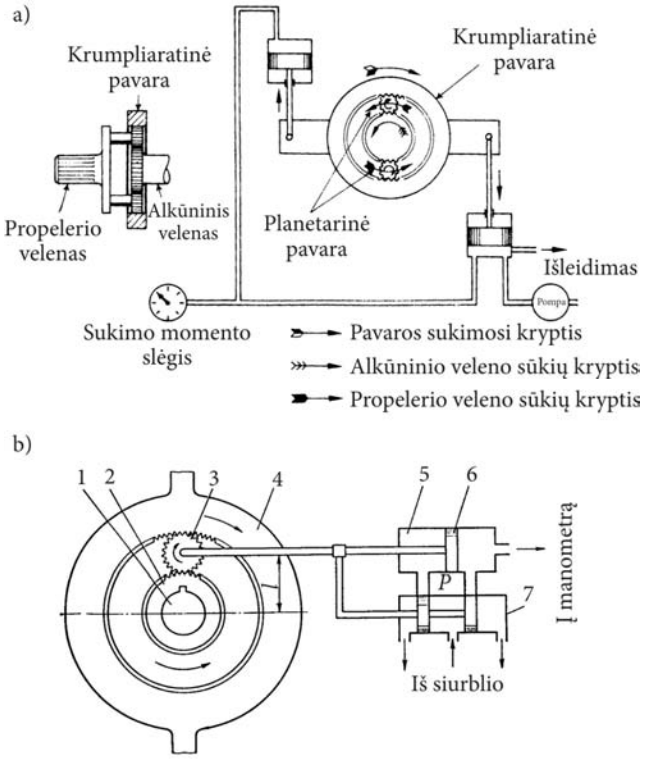
3.6. Traukos matavimo prietaisai

Turbosraigtinių aviacinių variklių sukimo momentas M_s ir turboreaktyvinių variklių traukos jėga P_T priklauso nuo: kuro sąnaudų G_T ir jo visiško sudegimo koeficiento; temperatūros ir dujų slėgio prieš turbiną; sūkių dažnio n, slėgio P_a ir temperatūros T_a skrydžio aukštyje; skrydžio greičio V.

Dėl sukimo momento M_S ir traukos P_T sudėtingos priklausomybės nuo minėtųjų parametrų dydžiai M_S ir P_T matuojami ***netiesiogiai*** – pagal variklių tvirtinimo elementų deformacijas arba sukimo momentu sukeltą reakciją, arba trauką.

3.6.1. Sukimo momento slėgio indikatoriai

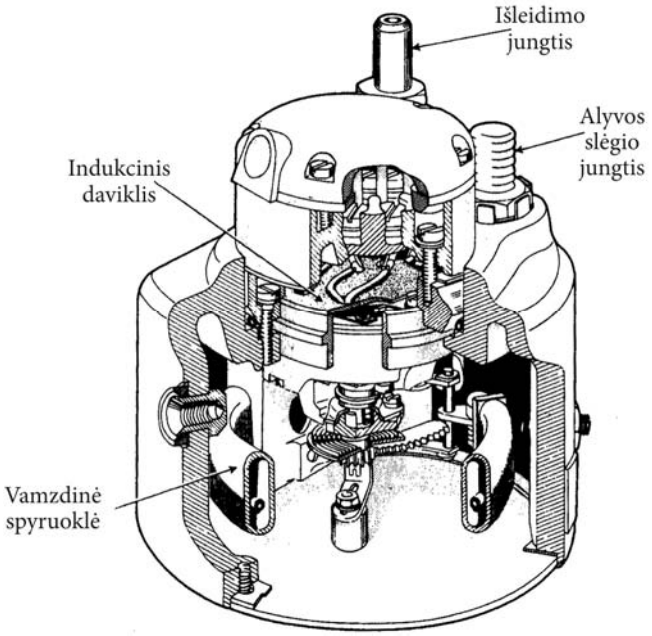
Iš pateiktos 3.6.1 pav., a funkcinės schemos matyti, kaip, matuojant variklio veleno sukimo momentą M_s, reaktyvinis momentas, veikiantis planetarinę pavarą, keičiamas į slėgį alyvoje.



3.6.1 pav. Hidraulinio variklio veleno sukimo momento keitiklio schema: 1 – variklio velenas; 2, 3 – reduktoriaus krumpliaračiai; 4 – sraigtas; 5 – cilindras; 6 – stūmoklis

Reaktyvinis momentas lygus turbosraigtinio variklio veleno *1* sukimo momentui, perduodamam per diskinio-planetarinio reduktoriaus krumpliaračius *2*, *3* orlaivio propelerio velenui *4*. Nusistovėjusiame režime krumpliaratis *3* ir stūmoklis *6* cilindre *5* palaikomi nurodytoje padėtyje. Kintant M_s, krumpliaratis *3* riedės per krumpliaratį *2*. Tuo pačiu metu stūmoklis *6* pasislinks, ir sklandyje *7* atsidarys alyvos išleidimo arba tiekimo iš siurblio kanalas. Naujasis slėgis *P* cilindre *5* grąžins stūmoklį į buvusiąją padėtį ir kompensuos reaktyvaus momento poveikį.

Alyvos slėgiui *P* cilindre *5*, tiesiogiai proporcingam momentui M_s, išmatuoti gali būti panaudotas distancinis elektromechaninis manometras su kompensacine schema arba manometras su nekontaktiniu indukciniu keitikliu 3.6.2 pav.



3.6.2 pav. Sukimo momento slėgio distancinis daviklis

3.6.2. Sukimo momento slėgio sinchroninės indikacijos sistemos

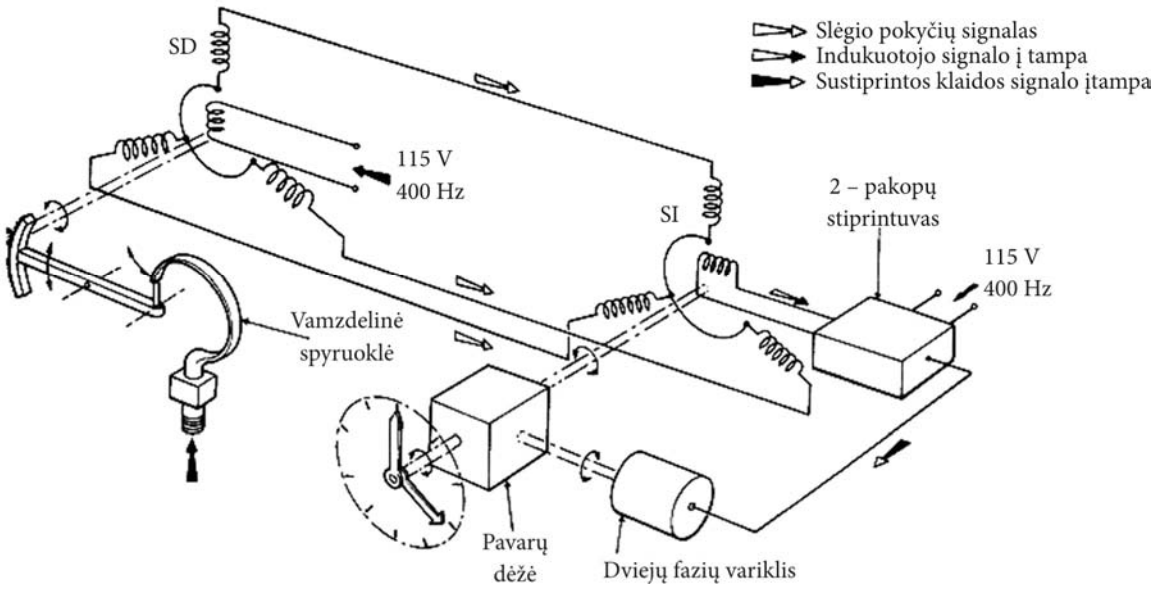
Šių sistemų paskirtis – tiekti informaciją ekipažui apie orlaivio sraigto veleno sukimo momento ar traukos jėgos kitimą realaus laiko masteliu. Tipinės sistemos funkcinė schema pateita 3.6.2 pav.

Sistemą sudaro sukimo momento slėgiui jautrus elementas ir matavimo rezultatų indikatorius, tarpusavyje sujungti sinchronine duomenų perdavimo linija.

Jautriuoju elementu naudojama vamzdinė spyruoklė, reaguojanti į hidraulinio daviklio (3.6.2 pav.) sukeliamą slėgį, proporcingą matuojamam sukimo momentui. Kintant slėgiui, atsiranda spyruoklės laisvojo galo tiesiniai poslinkiai kurie jungiamuoju mechanizmu keičiami į sukamuosius selsino-daviklio (SD) rotoriaus posūkius, perduodamus selsino-ėmiklio (SI) rotoriui.

Perduodant (3.6.3 pav.) sukimo momento slėgio pokyčius, „selsinine“ ryšio linija, selsino-daviklio rotoriaus poslinkiai sukelia selsino-ėmiklio statoriaus apvijose kintamosios krypties elektromagnetinį lauką, valdantį jo rotoriaus kampinę padėtį. Selsino-ėmiklio rotorius per pavarų dėžę nustato indikatoriaus rodykles į padėtį, atitinkančią pagal rodmenų skalę matuojamo sukimo momento reikšmę.

Siekiant išvengti paklaidų, atsirandančių kintant valdančiojo elektromagnetinio lauko krypčiai, indikatoriuje numatyta rodmenų korekcijos grandinė, sudaryta iš dviejų pakopų stiprintuvo ir koreguojančiojo dvifazio variklio. Korekcijos metu nuo selsino-ėmiklio rotoriaus apvijos nuimtas joje indukuotas paklaidos signalas sustiprinamas stiprintuvu ir tiekiamas į dviejų fazių variklį, kuris koreguoja indikatoriaus rodyklės „nulinę“ padėtį, kurios atžvilgiu nustatomi sukimo momento pokyčiai.



3.6.3 pav. Sukimo momento slėgio sinchroninės indikacijos sistemos funkcinė schema

Kadangi sukimo momento slėgio daviklis ir selsinas-daviklis yra orlaivio jėgainės sekcijoje, o selsinas-ėmiklis ir matavimo rezultatų indikatorius – pilotų kabinos prietaisų skydo sekcijoje, ekipažas gali stebėti variklio sraigto parametrų dinamiką realaus laiko masteliu, sinchronizuotai perduodamą iš matavimų objekto buvimo vietos į rodmenų atvaizdavimo vietą orlaivio ekipažo kabinoje.

3.6.3. Variklio traukos slėginio santykio indikacijos sistemos

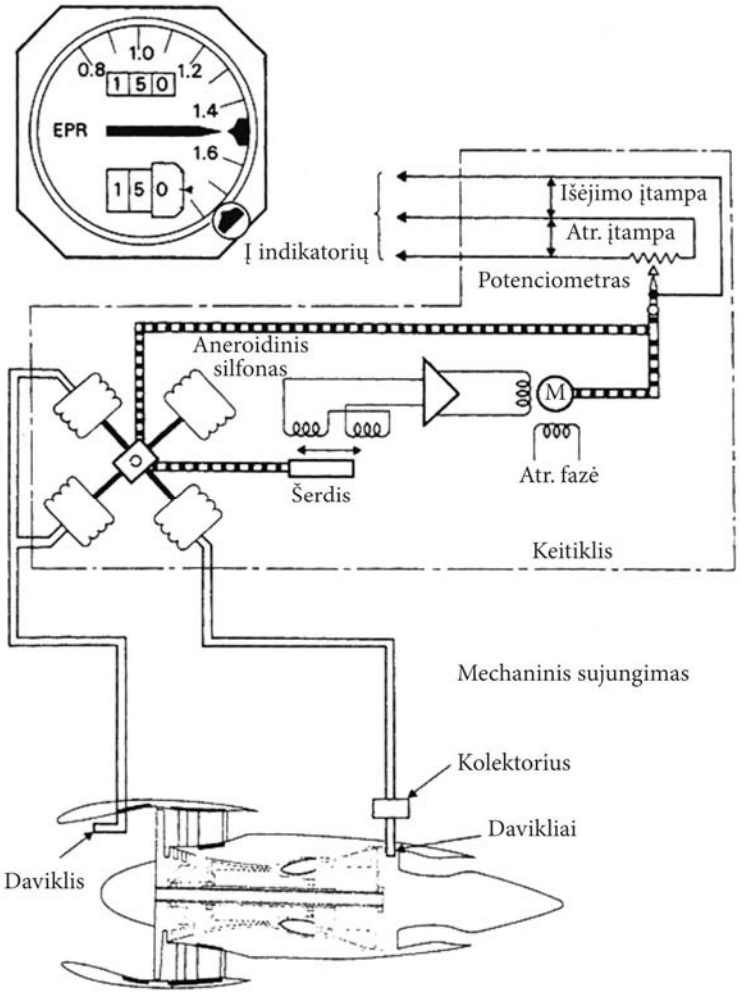
Turboreatyvinių variklių traukai vertinti plačiai naudojamos slėginio santykio turbinos išėjime ir įėjime indikacijos sistemos, dar vadinamos suslėgimo laipsnio sistemomis. Tokia sistema sudaroma iš turbinos įsiurbimo slėgiui jautraus elemento, kelių slėgio matavimo elementų turbinos išmetimo angoje, slėgių santykio keitiklio ir indikatoriaus. Šių dedamųjų sujungimo schema parodyta 3.6.3 pav.

Įsiurbimo slėgio daviklis, panašus į Pito vamzdį, montuojamas prie variklio turbinos įsiurbimo angos prieš įtekantį oro srautą. Daviklis turi apsaugą nuo apledėjimo, tiekiančia šilumą iš variklio analogiškos paskirties sistemos.

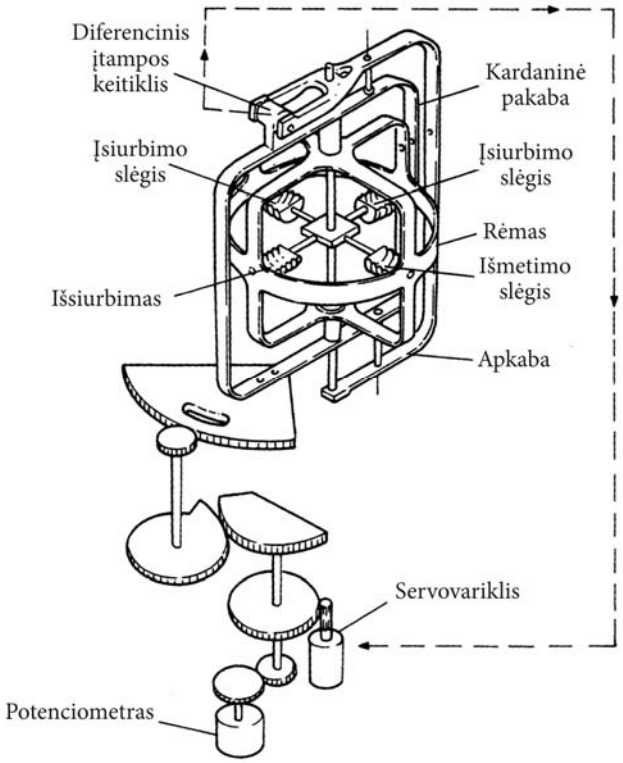
Išmetimo slėgio vamzdelių pavidalo davikliai, išdėstyti aplink turbinos dujų išmetimo angą, jungiami kolektoriumi į bendrąją slėgio perdavimo liniją, kurioje nusistovi vidutinis atskirų daviklių slėgis. Išmetimo slėgio daviklių vamzdynas su kolektoriumi ir įsiurbimo slėgio daviklis sujungiami su slėgio santykio keitikliu, kuris sudarytas iš silfoninių (dumplių pavidalo) slėgiui jautrių elementų ir tiesinio diferencinio įtampos keitiklio, nuosekliai sujungto su stiprintuvu, dviejų fazių servovarikliu, ir potenciometro šliaužikliu. Keitiklio silfonai sumontuoti po dvi poras stačiuoju kampu į žvaigždės pavidalo konstrukciją, sudarančią kardaninės pakabos vidinį rėmą, kuris turi galimybę pasisukti kardaninės pakabos atramose ir rėmo mazge.

Kardaninė pakaba mechaniškai susieta su servovarikliu per jo varomąją pavarą, tuo tarpu, kai apkaba sujungta su diferencinio įtampos keitiklio šerdimi. Servovariklis taip pat valdo potenciometro šliaužiklį, kurio padėtis nustato dydį įtampos, atitinkančios suslėgimo laipsnio rodytuvo rodmenų pokyčius. Sistemoje naudojamas tipinis nuotolinio valdymo rodytuvas su vertikaliaisiais skalės padėties poslinkiais rodyklės atžvilgiu.

Kaip matyti iš schemos 3.6.4 pav., turbinos įsiurbimo slėgį priima du suslėgimo laipsnio keitiklio sifonai, išmetimo slėgį priima trečiasis sifonas, tuo tarpu ketvirtasis sifonas – aneroidinis, t. y. jis hermetizuotas, prieš tai išsiurbus iš jo orą. Taigi sistema drauge su jos rėmu, kardanine pakabos ir apkabos mazgu, sudaro slėgių santykio balansinio matavimo sistemą, kurios rodikliu yra apkabos posūkio kampas, keičiantis diferencinio įtampos daviklio šerdies ilginę padėtį priešingai sujungtose indukcinėse ritėse.



3.6.4 pav. Slėginio santykio (suslėgimo laipsnio) indikacijos sistemos schema



3.6.5 pav. Suslėgimo laipsnio keitiklis

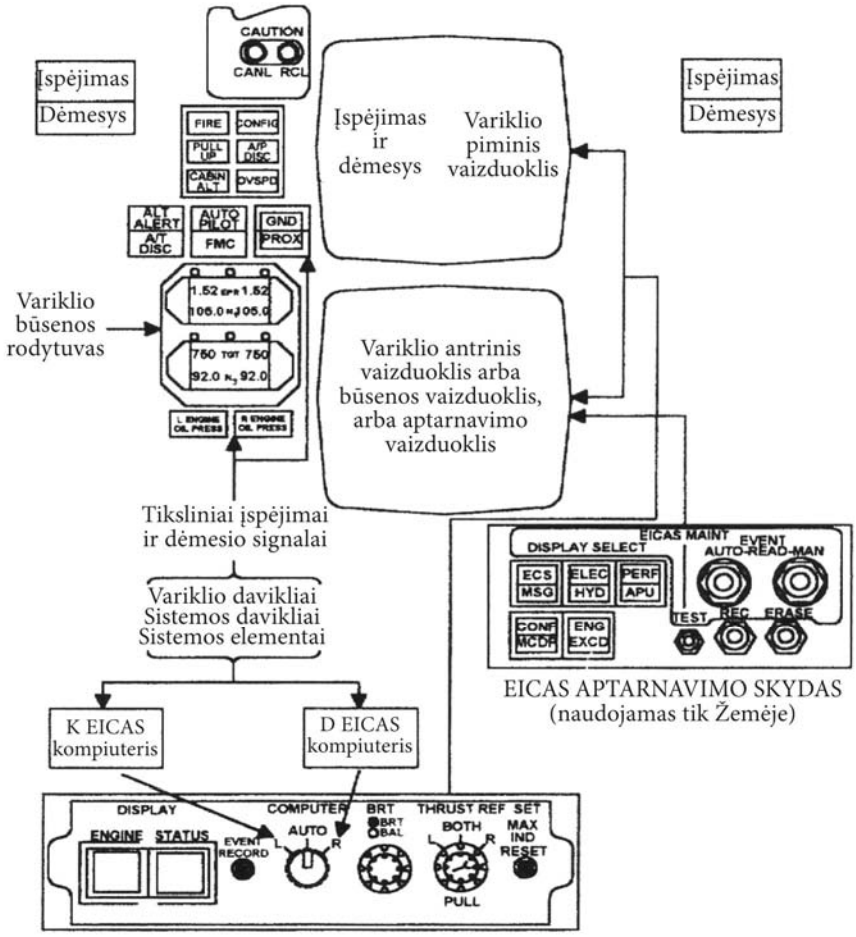
Pakitus suslėgimo laipsniui, atsiras slėginis silfonų sistemos disbalansas ir jį lydintis kardaninės pakabos rėmo ir apkabos tarpusavio poslinkis ašies AA (3.6.5 pav.) atžvilgiu. Šio poslinkio sukeltas diferencinio įtampos keitiklio šerdies postūmis keis keitiklio išėjimo įtampos fazę, valdančią per stiprintuvą servovariklio veleno posūkio kampą, atitinkamai kečiantį potenciometro šliaužiklio padėtį ir sistemos rodmenų rodyklės padėtį suslėgimo laipsnio matavimo skalės atžvilgiu. Tuo pačiu metu variklio pavara veiks keitiklio kardaninę pakabą ir diferencinio keitiklio rites priešinga pradinio apkabos manevro kryptimi, stengdamasi grąžinti keitiklio šerdį ir servovariklio ašį į pirmykštę padėtį. Taigi sistema stabilizuosis naujojo suslėgimo laipsnio atžvilgiu.

3.7. Informacinė sistema EICAS

Informacinė sistema EICAS (*Engine indication and crew alerting system*) skirta tiekti orlaivio įgulai informaciją apie orlaivio variklių veikimo parametrus ir įspėti pilotus apie nenormalų ar avarinį variklių, sistemų ir įrenginių darbą. Sistema turi du vaizduoklius (pirminį ir antrinį), įrengtus pilotų kabinos prietaisų lentoje.

3.7.1. EICAS architektūra

EISAS architektūra pateikta 3.7.1 pav. Du EICAS kompiuteriai gauna pirminius duomenis iš variklio ir sistemos daviklių. Priimta informacija atvaizduojama elektroninių vamzdžių vaizduokliuose, skalėse, skaitmeniniais rodmenimis ir įspėjimų, dėmesio bei patarimų pranešimais.



3.7.1 pav. EICAS architektūra

Parametrai, reikalaujantys nustatymo ir kontrolės skrydžio metu, įgulai nuolatos rodomi ekrane, tačiau sistema tikrina ir likusius parametrus ir vaizduoja juos tik tada, kai jie viršija leistinąsias ribas.

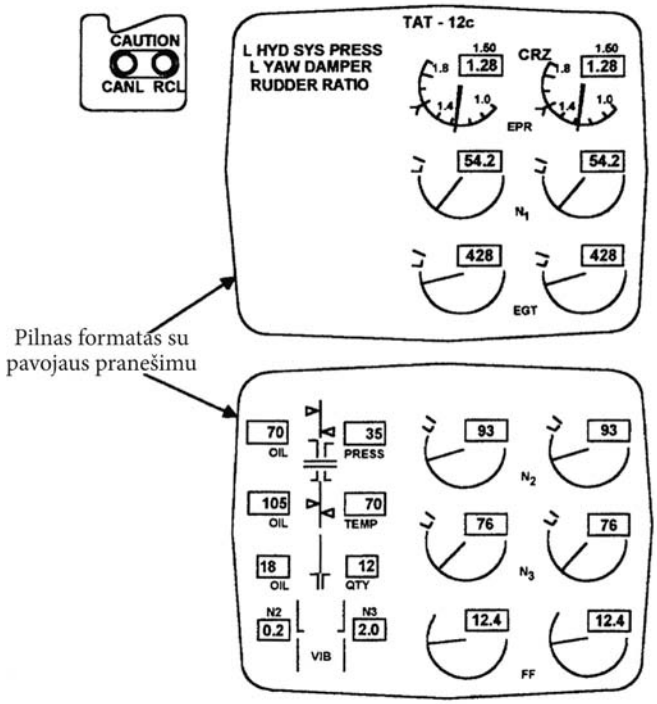
Kompiuterių pasirinkimo jungikliu pulte galima nustatyti, kuris kompiuteris valdo EICAS. Kada jungiklis nustatytas padėtyje AUTO, valdoma kairiuoju kompiuteriu, o jei kairysis kompiuteris neveikia, valdymas automatiškai perjungiamas dešiniajam kompiuteriui. Kada jungiklis padėtyje L, tiktai kairysis kompiuteris gali valdyti EICAS, o kai jungiklis padėtyje R, sistemą valdo tik dešinysis kompiuteris. EICAS kompiuteriai tikrina per 400 informacijos įvadų ir prireikus greitai bei vienareikšmiškai atpažįsta visapusiškų įspėjamųjų ir dėmesio sutelkimo sistemų problemas. Vaizduoklių ryškumui ir balanso valdymui naudojamas pulto ryškumo lygio reguliatorius perjungiamas abiem vaizduokliam.

Įvykiams registruoti naudojama duomenų įrašymo sistema į EICAS atmintį, kurią vėliau naudojasi techninės priežiūros personalas. Registravimo eigoje duomenys iš variklio sistemos daviklių įrašomi į atmintį, o vėliau gali būti ištrinti iš atminties valymo pulte esančiais jungikliais. EICAS valdymo pulte galima pasirinkti kelis informacijos vaizdavimo režimus, iš kurių pagrindinis yra variklio būsenos atvaizdavimas skrydžio metu – SEI (*Stanby Engine indication*).

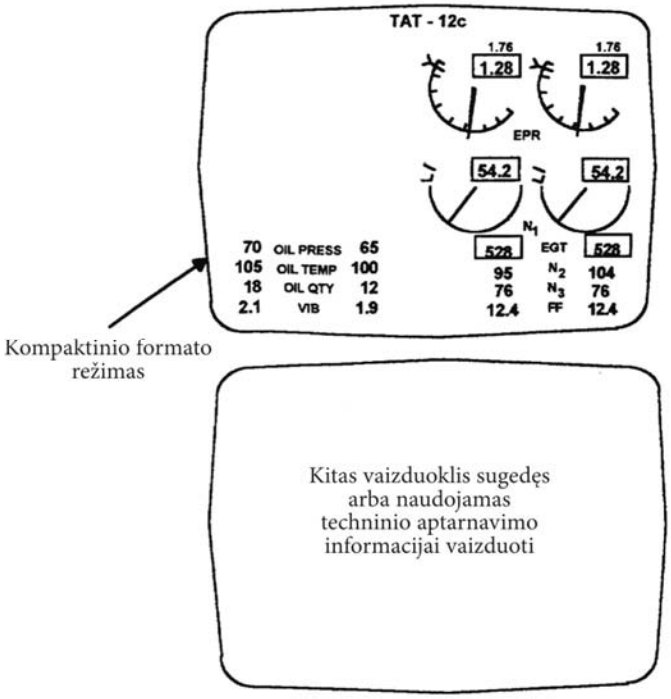
3.7.2. Variklių parametrų vaizdavimas

Šiame režime EICAS pirminis vaizduoklis tiekia informaciją orlaivio įgulai vaizduokliuose apie variklių veikimą ir įspėjamuosius pranešimus skrendant. Informacija apie variklių veikimą rodoma prietaisų lentos viduryje. Vaizduokliai gauna signalus iš dviejų signalų generatorių, kurie čia vadinami kompiuteriais (3.7.2 pav.). Kabinoje yra EICAS valdymo pultas. Vienas iš vaizduoklių (viršutinis, jei jie išdėstyti vertikaliai) rodo reikalingiausią informaciją apie variklių ir kitų pagrindinių sistemų veikimą (3.7.3 pav.).

Jame rodomas variklio aukštojo slėgio kompresoriaus sūkių dažnis Nl, dujų temperatūra EGT, degalų sąnaudos FF, avariniai įspėjimai, gali būti rodomas kompresoriaus oro suspaudimo laipsnis EPR ir kt. Antriniame vaizduoklyje galima matyti informaciją apie žemojo slėgio kompresoriaus sūkių dažnį N2 ir ventiliatoriaus sūkių dažnį N3, tepalo kiekį, tepalo slėgį ir temperatūrą, variklio vibracijų lygį ir kt.



3.7.2 pav. Variklių pirminių daviklių informacijos atvaizdavimas pilnu formatu



3.7.3 pav. Variklių informacijos atvaizdavimas kompaktiniu formatu

Sugedus kuriam nors iš vaizduoklių, informacija gali būti patiekiama kompaktiškų formatu (3.7.3 pav.). Šiuo formatu variklio pirminių daviklių informacija pareikiama įprastu pavidalu, o antrinė – glaustu, skaitmeniniu pavidalu.

3.7.3. Įgulos įspėjimai

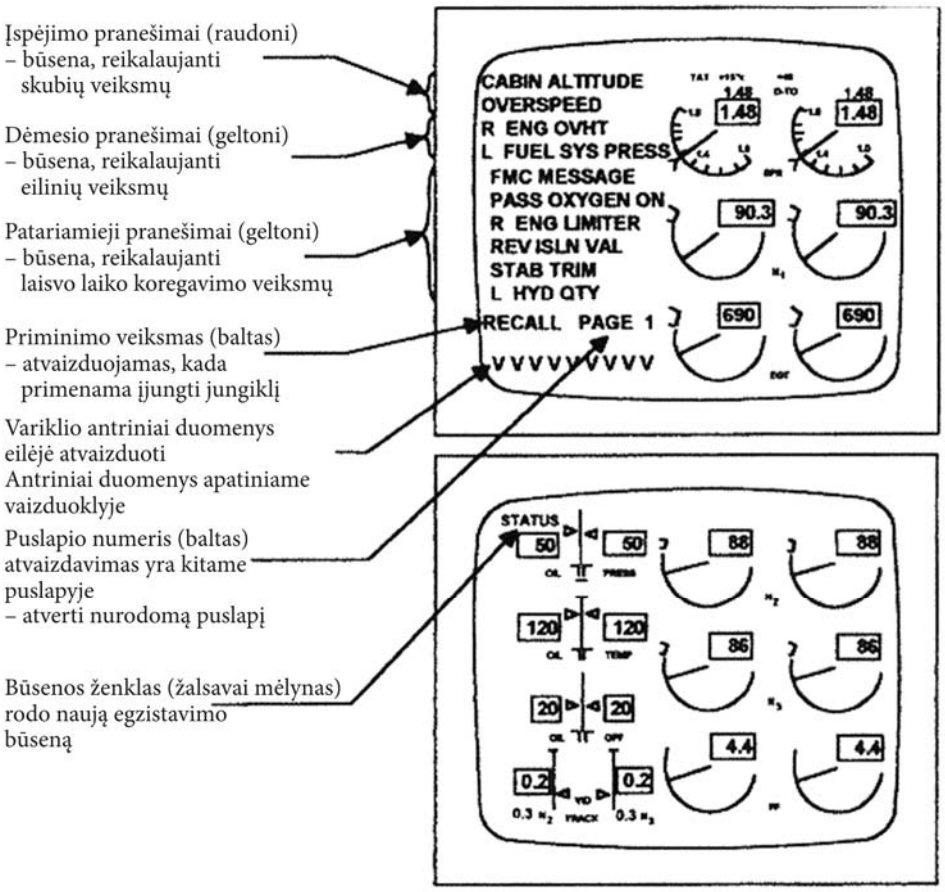
EICAS valdymo pulte gali būti mygtukas, kurį nuspaudus galima į kompiuterio atmintį įrašyti pagrindinių orlaivio sistemų (valdymo elektros, hidraulinės, pagalbinės jėgainės) gedimų signalus. Nors daugumos sistemų veikimo duomenys kompiuteryje įrašomi automatiškai, juos įrašius (nuspaudžiant minėtąjį mygtuką), galima peržiūrėti po skrydžio kartu su kitais duomenimis. Kai orlaivyje yra traukos automatas, EICAS valdymo pulte gali būti rankenėlė, kuria galima nustatyti norimą N1 reikšmę (nustatyti indeksą tachometro rodiklyje ties reikšme, kurią traukos automatas skrendant palaiko automatiškai).

EICAS nuolat gauna ir kompiuteriu apdoroja kelis šimtus signalų iš orlaivio variklių bei sistemų ir gali nedelsiant aptikti jų nenormalų veikimą ar gedimą. Jeigu taip atsitinka, pirminiame vaizduoklyje atsiranda pranešimų. Pagal situacijos pavojingumą ir pilotų veiksmų būtinumą, jie gali būti skirstomi į A, B ir C lygius. Tokių pranešimų gali būti daugiau nei dešimt (3.7.4 pav.).

A lygio įspėjimai reikalauja neatidėliotinų piloto veiksmų, jie yra raudonos spalvos. Kartu su jais mirksi vietiniai šviesos signalizatoriai: centrinis – „*Master Warning*“ („Pavojus“) ir atitinkamų sistemų gedimo signalizatoriai prietaisų lentoje (HYD, FUEL, ENG, APU ir t. t.), kabinoje girdima sirena. Tokie įspėjimai gali būti kilus gaisrui, krintant slėgiui orlaivio viduje ir pan.

B lygio įspėjimai taip pat reikalauja neatidėliotinų veiksmų, bet nėra katastrofiškai pavojingi. Jie yra geltonos spalvos, kartu mirksi atitinkamų sistemų gedimo šviesiniai signalizatoriai prietaisų lentoje, kabinoje girdisi sirena. Tokie įspėjimai atsiranda padidėjus variklio alyvos temperatūrai, dujų temperatūrai, sugedus orlaivio automatinei valdymo sistemai ir t. t.

C lygio įspėjimai rodomi irgi geltonai, bet sistemų gedimo šviesos signalizatoriai nešviečia ir sirenos nesigirdi. Šie įspėjimai atsiranda sugedus nuokrypių slopintuvui, dingus įtampai kurioje nors nepagrindinėje linijoje ir dar daugeliu kitų atvejų.

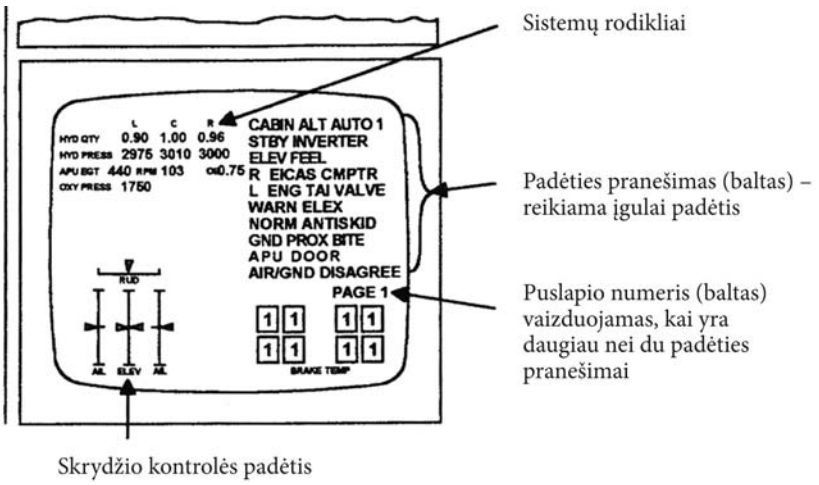


3.7.4 pav. Tipinis įspėjimų vaizdavimas

Visi įspėjimai vaizduoklyje automatiškai dingsta pašalinus jų atsiradimo priežastį. Vienu metu gali būti rodomi keli įspėjimai, kiek jų telpa vaizduoklio ekrane. Jei įspėjimų yra daugiau, jie skirstomi puslapiais. Tada vietoje apatinio įspėjimo rodomas puslapio numeris. Pirmojo lygio įspėjimai rodomi visuose puslapiuose.

3.7.4. Orlaivio sistemų padėties vaizdavimas

Tai sistemos orlaivio sistemų būsenos vaizdavimo režimas (*Status*). Jis dažniausiai naudojamas rengiantis skrydžiui: jo atveju antriniame EICAS vaizduoklyje rodomos orlaivio valdymo plokštumų ir stovėjimo stabdžių padėtys, galima patikrinti kitas sistemas: elektros, hidraulinio valdymo, kondicionavimo ir kt. (3.7.5 pav.).



3.7.5 pav. Orlaivio sistemų padėties vaizdavimas

Vaizduokliuose indeksai, ženklai, raidės ir skaičiai rodomi keliomis spalvomis, jų gali būti septynios. Balta spalva šviečia vaizduoklio rodyklės, normalius veikimo režimus atitinkančios skalių dalys, jose rodomos padalos. Raudonai rodomi avariniai pranešimai, įrenginių veikimas, viršijant leistinąsias ribas, vaizduoklio skalės dalys, kuriose įrenginio veikimas yra pavojingas. Žalia spalva rodo normalų įrenginio veikimą, žalios yra nustatytos traukos automato, Nl ir EPR reikšmės. Melsva spalva šviečia indeksai ir ženklai sistemos savikontrolės metu. Geltonai rodomi lakūnų dėmesį atkreipiantys pranešimai, nenormalus sistemų ar įrenginių veikimas, vaizduoklio skalės dalys, kuriose rodomas dydis yra nenormalus ir kt. Purpurine spalva rodomi skrydžiui reikalingi duomenys. Matuojamieji dydžiai (variklio sūkių dažnis NI, tepalo slėgis, dujų temperatūra ir kt.), įrenginių būklės pranešimai ir kitokia panaši informacija rodoma žydra spalva.

3.7.5. Aptarnavimo režimas

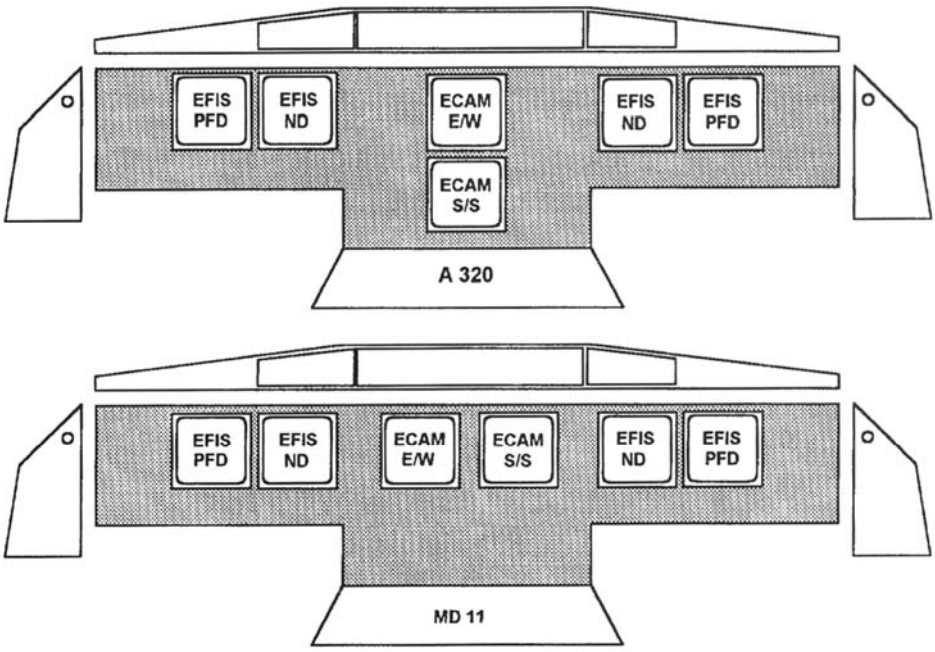
Trečiuoju režimu sistema antriniame vaizduoklyje rodo jos techninės priežiūros ar gedimų šalinimo metu reikalingą informaciją, skrendant tokios informacijos matyti negalima. Kai EICAS sugenda, orlaiviuose gali būti įrengtas mažas atsarginis skystųjų kristalų vaizduoklis, kuriame rodomi variklių sūkiai NI, N2, dujų temperatūra EGT ir jų didžiausios jų leistinosios reikšmės. EICAS gali turėti atskirą techninės priežiūros metu naudojamą valdymo pultą. Juo vaizduokliuose galima rodyti kompiuterio atmintinėje sukauptą informaciją apie orlaivio variklių ir sistemų veikimą.

3.8. Informacinė sistema ECAM

Informacinė sistema ECAM (*Electronics centralised aircraft monitor*) tieka pilotams vizualią informaciją apie orlaivių sistemų veikimą (3.8.1 pav.). Ji naudojama naujesniuose „Airbus“ orlaiviuose. ECAM jungia elektroninių prietaisų sistemą (EIS), turinčią 6 vaizduoklius, kurių dėka orlaivio įgula aprūpinama reikiama informacija ir patarimais, kaip valdyti orlaivio sistemas bei atpažinti jų būsenas (normali ar nenormali). Sistema panaudoja EFIS sistemos vaizduoklius ir 2 centre įstatytus nuosavus vaizduoklius:

– jėgainės ir įspėjimų vaizduoklis – *Warning Display* (E/W);
– sistemų ir būsenos vaizduoklis – *Status Display* (S/S).

Visi vaizduokliai yra orlaivio valdymo prietaisų skydo centre.



3.8.1 pav. ECAM sistemos vaizduoklių išdėstymo schemos:
A 320 – viršuje; MD 11 – apačioje

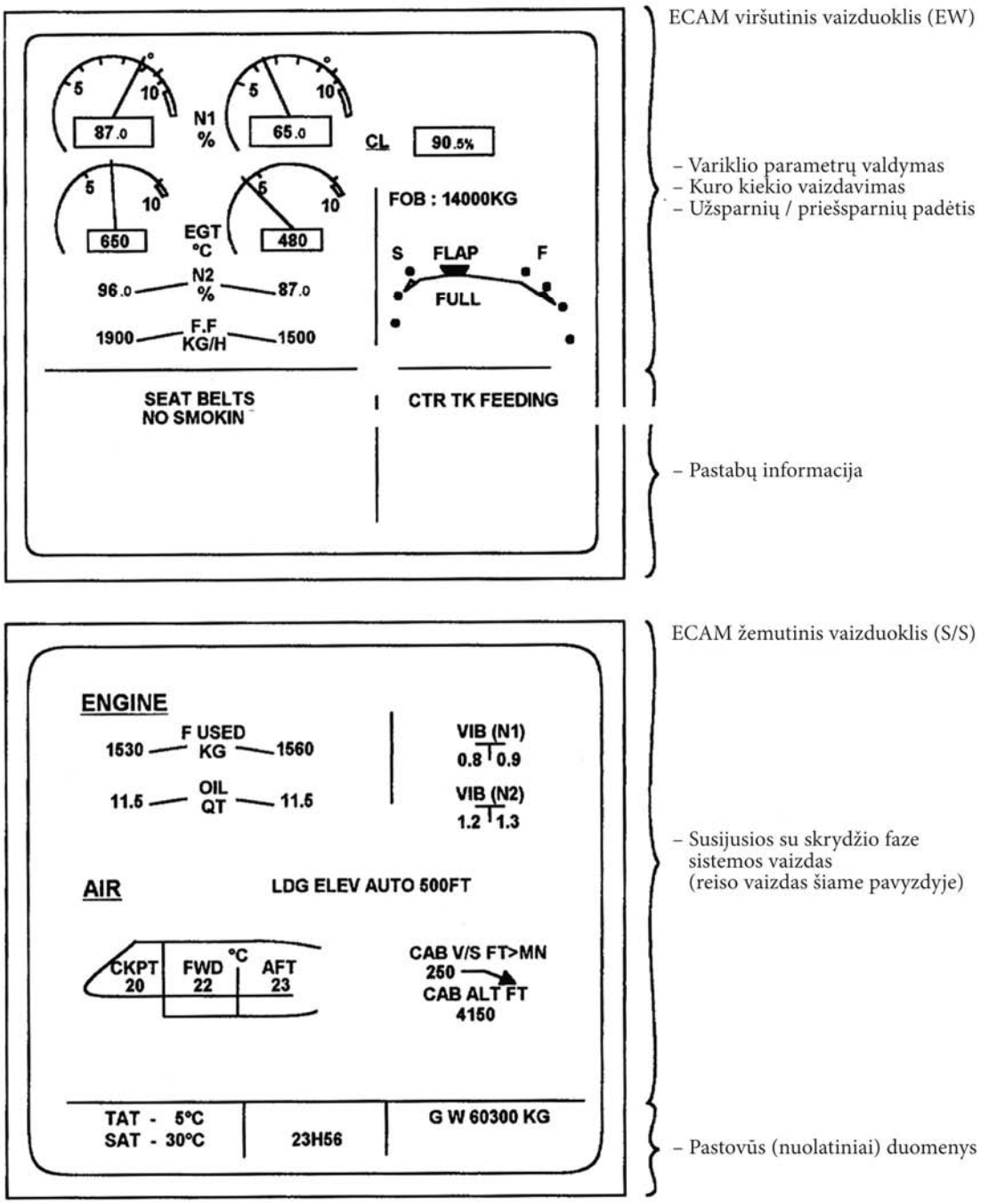
3.8.1 Informacijos vaizduokliai

Jėgainės ir įspėjimų (E/W) vaizduoklis rodo (3.8.2 pav.):

– jėgainės parametrus;
– degalų kiekį orlaivyje;
– priešsparnių ir užsparnių padėtį;
– įspėjamuosius ir dėmesio pranešimus;
– pastabas, kada įvyksta gedimai.

Sistemų ir būsenos (S/S) vaizduoklis rodo:

– sistemų apžvalgos diagramas;
– būsenos (padėties) pranešimus.

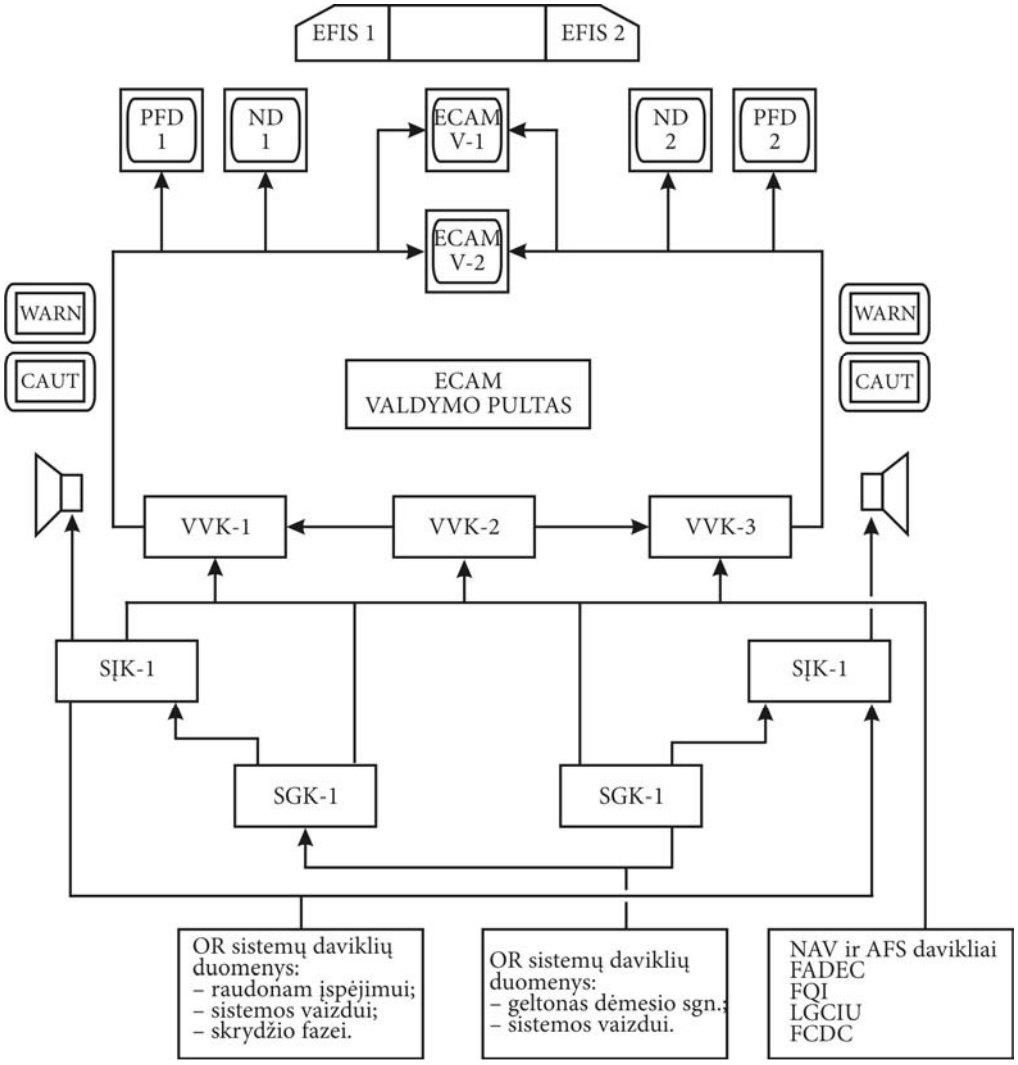


3.8.2 pav. Jėgainės ir įspėjimų (E/W) vaizduoklio rodmenų pavyzdys

3.8.2. ECAM architektūra

ECAM architektūrą (3.8.3 pav.) sudaro:

– sistemą valdantis pultas;
– du skrydžio įspėjimų kompiuteriai (FWCS), kurie generuoja pavojaus pranešimus, garsinius signalus ir balso pranešimus radijo transliavimui, kada orlaivio davikliai ar sistemos perduoda ***raudonus įspėjimus***, arba sistemų duomenų kaupikliai (SDAC) generuoja ***geltonus dėmesio signalus***;
– trys vaizduoklių valdymo kompiuteriai (simbolių generatoriai) (VVK), kurių signalus vaizduokliai paverčia spalvotu vaizdu;
– du sistemų duomenų kaupimo ir atpažinimo kompiuteriai (SDAC), kurie apdoroja duomenų kitimo eigą ir tiekiantys simbolių generatoriams (DMC) atvaizduoti jėgainės bei sistemų parametrus ir skrydžio įspėjimų kompiuteriams – duomenis pavojaus procedūrų pranešimams.

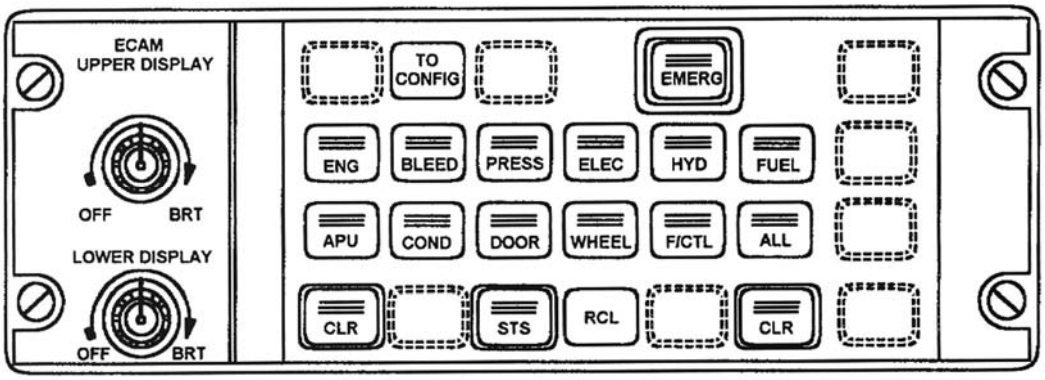


3.8.3 pav. ECAM sisteminė architektūra

3.8.3. ECAM valdymo pultas

Valdymo pulte galima pasirinkti, kuris simbolių generatorius kuriam vaizduokliui turi siųsti signalus, nustatyti norimą vaizdo ryškumą ir vieną iš pagrindinių orlaivio sistemų, kurios duomenų informaciją norima stebėti. Rodomą informaciją galima suskirstyti į keturias grupes, trys iš jų pasirenkamos automatiškai. Tai informacija apie skrydžio eigą, pilotams reikalingi patarimai ir nurodymai bei informacija apie sistemų ir įrenginių gedimus. Ketvirtoji rodomos informacijos grupė pasirenkama rankiniu būdu, ji reikalinga orlaivių įrenginių ir sistemų veikimui tikrinti.

Valdymo pulte 3.8.4 pav. pasirenkama, kurios sistemos veikimą norima stebėti ar tikrinti. Informacija apie skrydžio eigą rodoma nuo pat orlaivio pasiruošimo kilti iki nutūpimo. Pavyzdžiui, ruošiantis skrydžiui, kairysis vaizduoklis gali rodyti pranešimus, kad pagalbinė jėgainė veikia, stovėjimo stabdžiai įjungti, salone įjungti ženklai ***Nerūkyti*** ir ***Užsisekite saugos diržus*** o dešinysis vaizduoklis rodo visą kabinos ir salono durų schemą. Uždarytų durų simboliai yra žalios spalvos, o durų pavadinimai – baltos spalvos. Neuždarytų durų simboliai ir durų pavadinimai yra geltoni.



3.8.4 pav. ECAM valdymo pulto vaizdas

Informacija apie įrenginių ir sistemų gedimus turi pirmenybę prieš kitas tris rodmenų grupes. Pavyzdžiui, įvykus pirmojo elektros generatoriaus gedimui, kairysis vaizduoklis rodys pranešimą ***Gen.1 fault*** raudona ar geltona spalva, priklausomai nuo gedimo pavojingumo. Veiksmai, kuriuos turi atlikti pilotas, rodomi melsva spalva. Dešinysis vaizduoklis rodo visos orlaivio pirminės elektros energijos struktūrinę schemą, kurioje pirmojo generatoriaus įtampos ir dažnio reikšmės rodomos nuliais. Pilotui išjungus neveikiantį generatorių, kairiajame vaizduoklyje melsvos spalvos pranešimas pasidaro baltas. Dešiniajame rodoma, kad dešinysis generatorius tiekia srovę ir kairiajai, ir dešiniajai generatorių linijoms. Po gedimo atlikus visas reikalingas operacijas, pilotas gali valdymo pulte mygtuku išjungti rodomą informaciją, kad vėl galėtų matyti informaciją apie skrydžio eigą.

Rodomų pranešimų spalvos tokios pat kaip sistemoje EICAS. Balta spalva atvaizduojamos vaizduoklio rodyklės, skalės, jose rodomos padalos. Raudonai pateikiami avariniai pranešimai, įrenginių veikimui viršijant leistinąsias ribas, vaizduoklio skalės dalys, kuriose įrenginio veikimas yra pavojingas. Žalia spalva vaizduoja normalų įrenginio veikimą. Melsva spalva pateikiami pranešimai, kuriuos pilotas turi atlikti, ir simboliai arba ženklai sistemos ar įrenginio savikontrolės metu. Geltonai rodomi pilotų dėmesį atkreipiantys pranešimai, nenormalus sistemų ar įrenginių veikimas, vaizduoklio skalės dalys, kuriose rodoma parametro reikšmė nėra normos ribose ir pan. Purpurine spalva rodomi skrydžiui reikalingi duomenys. Matuojamieji dydžiai (variklio sūkių dažnis, alyvos slėgis ir kt.), įrenginių būsenos pranešimai ir kita panaši informacija vaizduojama žydra spalva.

LITERATŪRA

Cbyron, E. 1995. *Radar: principles, technology, applications.* USA: Prentice Hall, Inc., Toronto. 717 p.
Moir, I.; Seabridge, A. 2006. *Civil avionics systems.* John Wiley and Sons Ltd. 516 p.
Pallett, E. H. J. 1992. *Aircraft instruments and integrated systems.* England: Longman Group Limited. 440 p.
Pileckas, E. 2003. *Aviaciniai prietaisai*: laboratoriniai darbai. Vilnius: Technika. 36 p.
Pileckas, E. 2004. *Aviaciniai prietaisai*: mokomoji knyga. Vilnius: Technika. 243 p.
Savickas, A. 2002. *Orlaivių sistemos.* Vilnius: LŽŪU leidybos centras. 301 p.
Savickas, A. 2005. *Orlaivių valdymas ir navigacija*: mokomoji knyga. Vilnius: Technika. 567 p.
Spitrer, C. R. 2001. *The avionics hand book.* NewYork, Washington D. C.: Boca Ramion. 700 p.

Eugenijus PILECKAS

AVIACINIAI SKRYDŽIO VALDYMO PRIETAISAI IR SISTEMOS

Mokomoji knyga

Redaktorė *Laimutė Kertenienė*
Maketuotojas *Antanas Dvilevičius*
Viršelio dizainerė *Jevgenija Petkuvienė*

2011 09 05. 27,19 aut. l. Tiražas pagal poreikį
El. versija pagal leidinio identifikatorių doi:10.3846/1230-S
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“, Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius
http://leidykla.vgtu.lt
Spausdino UAB „Ciklonas“
J. Jasinskio g. 15, 01111 Vilnius