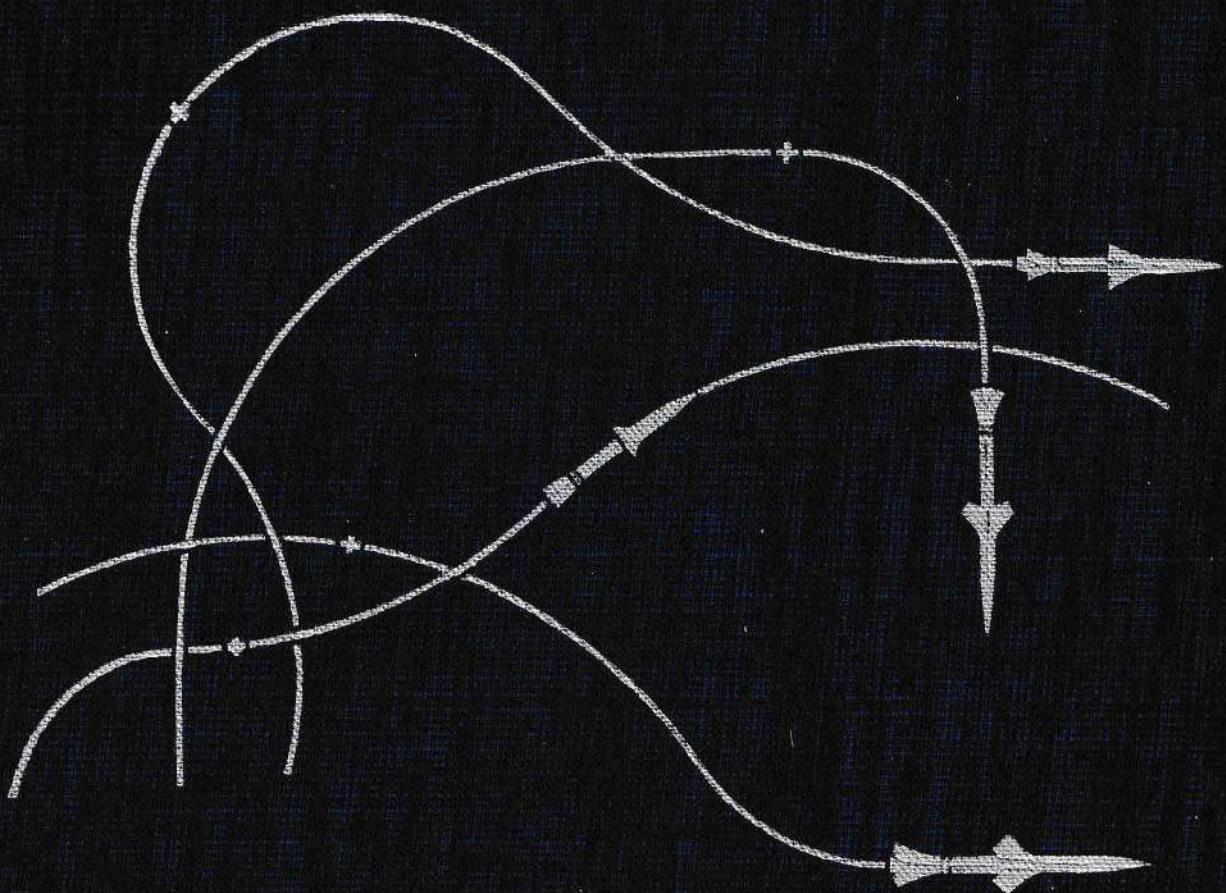


127.181



VODENI PROJEKTLI



VOJNA BIBLIOTEKA

INOSTRANI PISCI

KNJIGA TRIDESETA

UREĐIVAČKI ODBOR

Miroslav BORAS, Mirko BULOVIĆ, Boško ĐURIČKOVIĆ, Georgije JOVIČIĆ, Mihajlo
KOKOLJEVIĆ, Nikola LEKIĆ, Srećko MANOLA, Bogdan PECOTIĆ,
Zdravko ĐUKOVIĆ (odgovorni urednik)

VOJNOIZDAVAČKI ZAVOD

B E O G R A D

1 9 6 6 .

CENTRALNA VOJNA BIBLIOTEKA
INV. BR. 127181

VOĐENI PROJEKTLI



NASLOV DELA U ORIGINALU

GUIDED MISSILES

operations, design and theory

With a foreword by Lieutenant-General Charles T. Myers,
United States Air Force

SPONSORED BY THE DEPARTMENT OF THE AIR FORCE

Preveli sa engleskog

VLADISLAV MATOVIĆ, dipl. inž., ZDRAVKO POPIN, IVAN VUKOVIĆ, dipl. inž., TIBOR VARADI dipl. inž.

McGRAW — HILL BOOK COMPANY, INC.
NEW YORK — TORONTO — LONDON
1958.

S A D R Ž A J

<i>Glava</i>	<i>Odeljak</i>	<i>Naziv</i>	<i>Strana</i>
		Napomena uz naše izdanje	7
		Predgovor	8
1		Istorijat vođenih projektila	9
2		Aerodinamika vođenih projektila	23
3		Pogon vođenih projektila	55
4		Principi fizike na kojima se zasniva ustrojstvo vođenih projektila	93
	1	Optika koja se koristi za funkcionisanje vodenog projektila	112
	2	Primena optičkih i elektronskih principa . .	125
	3	Fizika tranzistora	137
	4	Modulacija nosećih talasa	148
	5	Elementi sistema upravljanja vođenim projektilima	167
	1	Osetni (merni) elementi sistema upravljanja .	170
	2	Računarski elementi sistema upravljanja . .	193
	3	Referentni elementi kontrolnih sistema . . .	215
	4	Pojačavači sistema upravljanja	225
	5	Regulatori u sistemu upravljanja	233
	6	Pogonski elementi sistema upravljanja . . .	239
	7	Povratne veze (povratne sprege) u sistemima upravljanja	253
	6	Sastavni delovi sistema za vođenje vođenih projektila	257
	1	Prijemnici u sistemima vođenja	259
	2	Računari u sistemu vođenja	284
	3	Referentni blokovi sistema vođenja	316
	4	Pojačavači, kontrolna kola, aktuatori i elementi povratne sprege sistema vođenja .	335
	7	Sistemi upravljanja vođenih projektila . . .	349
	1	Pneumatski i elektropneumatski sistemi upravljanja	354
	2	Elektrohidraulički sistemi upravljanja . . .	366
	3	Električni i pomoći sistemi upravljanja . . .	375
	4	Ispitivanje sistema upravljanja	381
	8	Putanje vođenih projektila	389

9	Sistemi za vođenje vođenih projektila	409
1	Sistemi vođenja malog dometa	411
2	Sistemi vođenja velikog dometa	412
3	Završno vođenje	432
4	Mešoviti sistemi vođenja	444
10	Borbena upotreba vođenih projektila	447
11	Merni instrumenti vođenih projektila	467
1	Metodi spoljnog telemerenja primjeni na vođene projektile	468
2	Načini unutrašnjeg telemerenja primjeni u vođenim projektilima	477
3	Dobijanje telemernih podataka u obliku pogodnom za upotrebu	511
4	Instrumenti za neposredno beleženje	529
Dodatak	Sistemi vođenja za projektile malog dometa	535

NAPOMENA UZ NAŠE IZDANJE

Savremene oružane snage ne mogu se ni zamisliti bez modernog naoružanja u kome vođeni projektili nesumnjivo predstavljaju značajan deo koji daje pečat savremenom ratovodstvu.

U ovoj knjizi su na pristupačan način izloženi osnovni elementi aerodinamike, pogona, elektronike i sistema za upravljanje i vođenje projektila koji su neophodni za razumevanje i poznavanje ovog modernog oružja i korisno mogu poslužiti svima koji se ovom materijom bave, bilo da tim oružjem rukuju, njime komanduju ili se za njega kao moderno oružje samo interesuju.

Oni koji se ovim problemima u većoj meri bave verovatno će zapaziti da su pojedine stvari već dalje razvijene i delimično brzim razvojem prevaziđene, ali to ne umanjuje značaj knjizi koja izlaže osnovnu materiju i omogućava bolje i svestranije razumevanje onoga što je već ostvareno kao i onoga što se sada usavršava ili će se u budućnosti izgraditi.

PREDGOVOR

U jesen 1957. čovek je gledajući u nebo mogao da vidi ostvarenje svog prvog uspešnog pokušaja da prirodi doda jedan satelit.

Piskutavi signali prvog veštačkog satelita najavili su početak kosmičkog doba.

Njegov početak pozdravljen je istim onim oduševljenjem koje je izazvala pojava prvog automobila i istom onakvom strepnjom koja je protatila pojavi prve atomske bombe.

Naše nacionalne oružane snage odigrale su važnu ulogu u rađanju kosmičkog doba ne samo na području proizvodnje raketa, nego i u pogledu obuke ljudstva koje je potrebno za rad sa njima.

Godine 1955. nastavnici i štab škole za vođene projektile u vazduhoplovnoj bazi u Louriju (L o w r y, država Kolorado), koja je potčinjena Komandi za vazduhoplovnu obuku, sastavili su prvi priručnik o osnovama vođenih projektila. Njegovim objavljinjem počelo je doba u kojem će se jednog dana tehnološka pravila i priručnici koji govore o vođenim projektilima brojati na hiljadu.

Taj priručnik Komande za vazduhoplovnu obuku, sada doteran i izdat kao Vazduhoplovno pravilo 52—31 (Air Force Manual, 52—31) prvo je delo o osnovama vođenih projektila. Njegova sadašnja ponovna prerada u obliku knjige pruža američkoj javnosti i istoriju vođenih projektila i osnovna zvanja o aerodinamici, o pogonskim gorivima i motorima, o spravama i instrumentima za prikupljanje podataka prilikom eksperimentalnih letova projektila i o elektronskim sistemima za njihovo upravljanje i vođenje.

Mada na izgled složena, ova knjiga pruža tek nešto više od osnovnih pojmova u oblasti, gde se nauka i tehnologija kreću u svojim najvišim oblicima. Budućnost će dodati obilje materijala koji će proširiti, a možda i pobiti tvrdnje koje se sada smatraju kao činjenice.

Ako čitalac ove knjige dobije utisak da će vreme raketa, projektila i satelita biti »vreme pritiskanja na dugme«, onda je neophodno upozoriti na jednu stvar: *n e s m e s e u m a n j i v a t i č o v e k o v a u l o g a*.

Naš svet na koji ima uticaja ono što se dešava u kosmičkom prostoru, zahtevaće mislioce, planere, tehnologe, naučnike, proizvođače i istraživače koji imaju potrebna znanja iz matematike i drugih nauka. Taj će se zahtev pojačati kad letelice s ljudskom posadom za istraživanje spoljnog prostora postanu stvarnost.

Događaji su do sada diktirali da se razvoj svega onog što je u vezi s kosmičkim dohom umnogome posmatra s vojničke tačke gledišta. Budućnost će verovatno omogućiti da se plodovi nauke i na ovom području koriste za progres čitavog čovečanstva.

General-potpukovnik Vazduhoplovstva SAD
Čarls T. MAJERS (Charles T. Myers)

Istorijat vođenih projektila

Danas je zaista mogućno razoriti jedan grad pritiskom na dugme koje bi izbacilo vođeni projektil koji nosi bombu. Ova letelica imala bi nuklearnu bojnu glavu. Ubuduće bezbednost naše zemlje može umnogome da zavisi od vođenih projektila ovog tipa.

U prošlosti vazduhoplovstvo je zavisilo od bombardera za nošenje atomske bombe. Vazduhoplovstvu je tada bila potrebna nadmoćnost u vazduhu i slaba ili nikakva protivvazdušna odbrana protivnika da bi se obezbedilo izbacivanje bombi na cilj.

Međutim, vođeni projektil može da odnese bombu na cilj bez nadmoćnosti u vazduhu; on može da prode pored bilo kojeg sadašnjeg sredstva za presretanje zato što je sposoban da leti nadzvučnim brzinama. Vođen sopstvenim električnim mozgom, on je sposoban da razori svaki cilj, pa bila to fabrika u gradu, vojno postrojenje, ratni brod ili vazduhoplov.

Pri pokušaju da se presretne konvencionalnim vazduhoplovom ili vođenim projektilom, projektil može čak da bude sposoban da otkrije približavanje presretača i da ispalji manje projektile za odbranu. Manji projektili, raspolažući sopstvenim električnim mozgom i raketnim motorom, otkriće i uništite dolazeći vazduhoplov ili projektil, omogućavajući time projektilu koji nosi bombu da nesmetano nastavi svoj let ka cilju.

S pojavom vođenih projektila nastala je nova oblast burnog razvoja ratne tehnike. Za opsluživanje vođenih projektila traže se hiljade veštih tehničara i inženjera. Ovu oblast karakterišu nadzvučne brzine i veoma velike visine leta projektila. Nove brzine i nove visine premašuju mogućnosti čoveka u pogledu pilotiranja vaz-

duhoplovom. Zbog toga se moraju upotrebiti elektronski ili automatski sistemi za vođenje.

Cilj ovog priručnika je da vam pruži osnovna znanja iz oblasti projektila — da vas upozna s aerodinamikom, pogonom, priborima za merenje i elektronskim sistemima za vođenje i upravljanje koji se upotrebljavaju u vođenim projektilima. Naučiće, takođe, nešto o mogućnostima projektila, o tome kako se oni upotrebljavaju i kakav bi mogao biti vaš posao u raketnom divizionu.

Ono što je nekad bila soba za pilota, u kojoj su se oni upoznavali sa zadatkom i spremali za let, to je sada punkt za kontrolu i vođenje projektila na lansirnom mestu. Na tom mestu vrše se potrebna podešavanja na uredajima projektila, da bi on potom leteo na određenoj visini i nadzvučnom brzinom stigao na izabrani cilj i uništio ga.

Mogućnosti vođenih projektila kao efikasnog oružja su, izgleda, neograničene. Treba podvući da uspeh napada projektilima u velikoj meri zavisi od stepena obučenosti borbenog sastava raketne jedinice.

KRATKA ISTORIJA VOĐENIH PROJEKTILA

Kao što II svetski rat nije vođen po receptima iz I svetskog rata, tako se ni do pobede u budućem ratu neće doći ako se avijacija primenjuje na način na koji je primenjivana u II svetskom ratu. No, rešenja problema vođenih projektila u budućnosti nalaziće svoj koren u iskustvima prošlosti. Samo, ako treba da se učimo na ovom do čega se u razvoju projektila

došlo u prošlosti, onda se te pouke moraju analizirati i primeniti u svetu sadašnje situacije.

Ideja o vođenim projektilima rodila se u I svetskom ratu. Primena aviona u ulozi borbenog sredstva podstakla je misao da se konstruiše vazduhoplov kojim bi se upravljalo sa daljine, a koji bi služio za bombardovanje cilja. Oni koji su prednjaciili na tom polju istraživanja bili su Orvil Rajt (*Orville Wright*), koji je leteo na prvom avionu, E. A. Speri (*Sperry*), član Kompanije »Speri Žiroskop«, i Čarls F. Ketering (*Charles F. Kettering*) iz Korporacije »Dženeral motors«. Ti su ljudi izmislili i ispitali prvi projektil — malu verziju aviona koji se u to vreme upotrebljava. Mada prvi projektil nije upotrebljen u borbi, ta rana ispitivanja dala su vrlo značajan rezultat, koji se sastojao u preporuci da se svaki budući rad mora orijentisati ka konstruisanju vazduhoplova kojim bi se upravljalo pomoću radija, tako da se projektilu u toku njegovog leta mogu davati potrebne popravke.

Godine 1924. određena su finansijska sredstva za izradu projektila kojim bi se upravljalo radio-putem. Dvadesetih godina izvršeni su mnogobrojni i prilično uspeli letovi s radio-vodenjem. Međutim, oko 1932. projekt je okategorisan kao luksuz, pa je rad na njemu, zbog nedostatka finansijskih sredstava, prekinut.

Oko 1935. god. dva brata po imenu Gud (*Good*), amateri modelari aviona, izradili su i isprobali model aviona koji je bio vođen pomoću radio-talasa sa zemlje. To su bili prvi poznati letovi potpuno vođeni radio-putem.

Radio-vodene mete, koje su američka vojska i mornarica koristile prilikom vežbi u gađanju ciljeva u vazduhu, bile su prvi vazduhoplovi koji su vođeni sa daljine.

U decembru 1941. god., baš pred ulazak SAD u II svetski rat, radio-vodeni vazduhoplovi bili su već toliko usavršeni, da je general Arnold, tadašnji načelnik štaba vazduhoplova kopnene vojske ozbiljno razmatrao pitanje njihove upotrebe kao borbenog sredstva.

Mi smo dosad govorili samo o projektilima koji su dobijali pogonsku snagu od motora s unutrašnjim sagorevanjem i od propelera. No radilo se i na razvoju projektila koji bi upotrebljavali reaktivne motore, uključujući tu raketne motore, koji sadrže sve elemente potrebne za proizvodnju pogonske snage, i mlazne motore, koji zavise od okolne atmosfere kao izvora kiseonika. Kad se za vazduhoplov naprave atomski motori, onda će se možda mlazni i raketni motori kao sredstva za pokretanje projektila izbaciti iz upotrebe. Pogledajmo sada napredak koji je na polju raketne tehnike postignut u Sjedinjenim Američkim Državama.

RAZVOJ AMERIČKE RAKETNE TEHNIKE

Doktor Robert H. Godard*) (*Goddard*), koji je neko vreme bio profesor fizike na Klarkovom univerzitetu u Vusteru (*Worcester*), država Massačusets (*Massachusetts*), bio je umnogome zaslужan što se početkom dvadesetih godina naglo pojavilo interesovanje za rakete. Kad je on počeo da izvodi svoje opite sa raketama, o njima nisu postojale nikakve tehničke informacije. On je započeo da radi na jednoj novoj nauci, industriji i grani tehnike. Svojim naučnim eksperimentima, Godard je pokazao put koji je doveo do razvoja raketaka vele danas poznajemo. Smitsonski (*Smithsonian*) institut je pristao da finansira njegove eksperimente u 1920. god. Na osnovu tih eksperimenata Godard je napisao knjigu »Metod za dostizanje vrlo velikih visina« (*A Method of Reaching Extreme Altitudes*), u kojoj je opisana raketa na principu stepena tj. višestepena kosmička raket, teorijski sposobna da dospe na Mesec.

Godard je otkrio da se pomoću pravilno izrađenog, glatkog i koničnog mlaznika može za osam puta povećati brzina isticanja produkata sagorevanja iste težine goriva. Saglasno njegovoj teoriji, to bi pogonilo raketu ne samo osam puta brže, nego i šezdeset i četiri puta dalje. U početku svojih eksperimenata on je otkrio da mu rakte sa čvrstim gorivom ne mogu dati toliku potisnu snagu ili potisnu snagu tolikog trajanja kolika je, odnosno kakva je potrebna da bi se dobio pouzdan nadzvučni motor sposoban za dostizanje vrlo velikih visina. Na dan 16. marta 1926. god., posle mnogo pokušaja, Godard je, prvi put u istoriji, uspešno ispalio u vazduh jednu raketu sa tečnim gorivom. Ona je dostigla visinu od 55 m i razvila brzinu od 97 km na čas. U poređenju sa današnjim brzinama i visinama letova raket, to izgleda malo, ali u ono vreme Godard nije nastojao da postigne što veću brzinu i visinu, nego da izradi siguran raketni motor.

Kasnije je dr Godard bio prvi koji je ispalio raketu bržu od zvuka. Isto tako, on je bio prvi koji je izradio žiroskopsku aparaturu za upravljanje raketama. On je prvi primenio kormila u mlazu gasova, koji izlaze iz motora, za stabilizaciju raketu u početnoj fazi njenog leta. On je i prvi patentirao ideju o višestepenoj raketni. Pošto je dokazao na papiru i putem stvarnih proba da se raketu može kretati u bezvazdušnom prostoru, razradio je matematičku teoriju o raketnom pogonu i letu raket, uključujući i

*) Goddard, Robert Hutchings (1882—1945) američki fizičar; bavio se istraživanjem raket za postizanje velikih visina, u Rosvelu, Novi Meksiko (od 1934. god.). — Prim. red.

osnovne nacrte za raketu velikog dometa. Svim tim informacijama raspolagali su vojni stručnjaci pre II svetskog rata, ali je očigledno da neposredna upotreba tih informacija nije izgledala primenljiva. Pred kraj II svetskog rata otpočeo je intenzivan rad na razradi vođenih projektila sa raketnim pogonom pri tome su korišćeni eksperimenti i dostignuća dr Godarda i Američkog raketnog društva (*American Rocket Society*).

Američko raketno društvo radilo je na razvoju raketa i raketnih motora posle svog osnivanja 1930. god. Njegov prvi motor zasnivao se najvećim delom na nacrtima koji su 1931. god. dobijeni od Nemačkog raketnog društva. Američko raketno društvo prvo je koje je napravilo sekcijski raketni uređaj, kojim su se mogli ispitivati motori raznih veličina i oblika, što je imalo za posledicu smanjivanje troškova oko tog ispitivanja.

Godine 1941. nekoliko članova Američkog raketnog društva obrazovalo je Kompaniju poznatu sada pod imenom Preduzeće za reaktivne motore (*Reaction Motors, Inc.*). Cilj je bio razrada i proizvodnja raketnih motora i za vojnu i za civilnu upotrebu.

RAZVOJ NEMAČKIH RAKETA

Prvi let rakete sa tečnim gorivom u Evropi izveden je u Nemačkoj 14. marta 1931. godine, pet godina nakon što je Godard izvršio svoj prvi uspeli opit sa takvim gorivom. Tim poduhvatom rukovodio je nemački naučnik Vinkler (*Winkler*). On je uskoro posle toga događaja izgubio život u toku jednog od svojih eksperimenta.

Nemačka je u to vreme počela shvatati budući značaj raketu sa tečnim gorivom za vođenje rata. Godine 1932. nemački general Valter Dornberger (tada kapetan) dobio je potrebno odobrenje za razradu raketnih motora sa tečnim gorivom za ratne svrhe. Oko 1936. god. Nemačka je izradila obiman projekt za istraživanje i razvoj vođenih projektila. U okviru ostvarenja tog projektila, ona je utrošila 40,000.000 dolara za podizanje velike naučno-istraživačke laboratorije u Penemindenu (*Peenemuende*). Hitler je naredio da se za rad u toj laboratoriji angažuju članovi Nemačkog raketnog društva i preuzeo takve mere da se taj rad ne otkrije, da je on ostao tajna za ceo ostali svet sve do poraza Nemačke. Za to vreme Sjedinjene Američke Države poklanjale su malo pažnje pitanjima razvoja mlaznih i raketnih motora za bilo koje specijalne svrhe.

Raketa je bila samo jedan od tipova mlaznih motora na kome se počelo raditi u ovom veku. Još 1913. god. francuski inženjer Rene Loren (*René Lorin*) predložio je i prvi patentirao ideju o nabojnomlaznom motoru. Posle Lorenovog patent došao je 1928. god. mađarski patent na sličan motor, a 1933. i drugi francuski patent. Nijedna od predloženih ideja nije realizovana kao mašina sposobna za rad. Do neuspeha nije došlo zbog toga što se nisu poznavali principi rada takvih motora, nego zato što se stvarno ništa nije znalo o aerodinamici radnog tela koje ima veliku brzinu. Letelica s nabojnomlaznim motorom koji je bio sposoban da razvija veći potisak nego što je otpor, ispitana je prvi put tek 32 godine nakon pojave Lorenove zamisli. To je učinjeno u junu 1945. kada je Laboratorijska primenjena fiziku (*Applied Phisics Laboratory*) na Univerzitetu Džona Hopkinsa izvela prvi uspešni let aviona s nabojnomlaznim motorom.

Preteča današnjih turbomlaznih motora nije bio termički nego mehanički mlazni motor. Godine 1927. italijansko Ministarstvo vazduhoplovstva počelo je da ispituje mogućnosti pokretanja aviona pomoću običnog propeleru stavljene u kanal koji ima oblik reaktivnog mlaznika. Ovaj uređaj s tzv. »tunelskim propelerom« bio je jedna forma mehaničkog mlaznog motora. Probe s njime pokazale su da on ima odlične manevarske sposobnosti i odličnu stabilnost, mada njegove opšte letne karakteristike budu osrednje. Godine 1932. Italijan Kampini (*Campini*) konstruisao je avion s termičkim mlaznim motorom, a docnije je i leteo s njim. Ali njegov motor ipak nije bio turbomlazni, jer je kompresor stavljen u pokret običnim motorom s unutrašnjim sagorevanjem a ne gasnom turbinom.

Uskoro se u raznim zemljama pojavljuju poboljšani mlazni motori. Mladi britanski inženjer i vazduhoplovni oficir Frenk Vitl (*Frank Whittle*) dobio je patent na jedan termomlazni motor još 1930. god. Vitlova konstrukcija je eliminisala običan motor kao sredstvo za pokretanje kompresora. Umesto njega ona je imala gasnu turbinu, za čije se pokretanje koristila smeša vazduha i gasova koji nastaju kao rezultat sagorevanja pogonskog goriva. Turbina je pokretala kompresor. Sedmog aprila 1941. god. jedan avion tipa Gloster »Pioneer«, snabdeven Vitlovim motorom, podigao se za vreme proba rulanjem i preleteo oko 150 m na visini od oko 2 m. Petnaestog maja 1941. god. ovaj avion s turbomlaznim motorom izvršio je prvu zvaničnu probu letenja 17 minuta.

Posle tih uspešnih letova, američko vazduhoplovstvo poslalo je u Englesku grupu ljudi radi proučavanja motora. Ovaj je kasnije usavršavan po zajedničkom britansko-američkom projektu. U to vreme za 15 letova bilo je ostvareno svega 10 časova rada mlaznog motora.

Razrada turbomlaznih motora u SAD bila je poverena »Kompaniji dženeral elektrik« (*General Electric Company*), pošto je ona imala iskustva u razradi i proizvodnji turbokompresora. Danas turbomlazne motore prave i usavršavaju skoro sve kompanije za proizvodnju avionskih motora. U sadašnje vreme turbomlazni motor je jedini vazdušno-reaktivni motor, pomoću kojeg se avion ili raketa može podići sopstvenom snagom, bez pomoći bustera.

Drugi tip vazdušno-reaktivnog motora je praskavomlazni motor. Taj tip motora patentirao je 1930. god. jedan nemački inženjer, no za rad sposoban praskavomlazni motor nije usavršen sve do II svetskog rata. On je postao čuvan u ratu kao motor nemačke leteće bombe V-1, koju je pokretao brzinom od 725 km na čas.

Godine 1940. s »Korporacijom dženeral motors« (*General Motors Corporation*) potpisani je ugovor za proizvodnju i razradu vođenih bombi na mlazni pogon, čijom bi se konačnom varijantom komandovalo (vodilo) i upravljalo pomoću televizije. U 1941. i 1942. god. izvršena su mnogobrojna ispitivanja tih bombi. Rezultati tih ispitivanja doveli su do razrade novih tipova bombi s mlaznim motorima.

JAPANSKI I NEMAČKI VOĐENI PROJEKTILI U II SVETSKOM RATU

Japanci su u II svetskom ratu mnogo zaostajali za Nemcima u pogledu vođenih projektila. Bomba »baka«, koju su oni upotrebljavali u toku rata, nije bio vođen projektil u pravom smislu te reči, nego bomba s raketnim motorom, kojom je upravljaо pilot-samoubica, a bila je namenjena za upotrebu protiv ciljeva na vodi. Mada je postigla izvestan uspeh, ona je imala slabu manevarsku sposobnost, zbog čega je velik broj tih bombi oboren vatrom protivavionske artiljerije.

Japanci su takođe ispitivali planirajuću bombu s raketnim motorom koja je izbacivana iz aviona i koja je vođena pomoću radija. Ona je trebalo da se izbacuje s male visine i da bude vođena na daljine do 4 km. Zbog načina na koji je vođena, bila je lak cilj za protivavionsku artiljeriju. Projekt je odbačen pre završetka rata.

Rad Nemaca u oblasti vođenih projektila tokom II svetskog rata bio je najuspešniji. Njihovi najpoznatiji projektili bili su V-1 i V-2 (oba

tipa zemlja — zemlja). Prototip prvog od njih izrađen je i u Penemindeu isprobao još u proleće 1942. Godine 1943. Nemci su radili na 48 različitih vođenih projektila zemlja-vazduh. Kasnije je rad na tim prototipovima objedinjen u 12 projekata, sa ciljem da se što pre ostvari upotrebljivo oružje. Pred kraj rata svi napori bili su usmereni na proizvodnju vođenog projektila zemlja-vazduh sposobnog za presretanje savezničkih bombardera.

Raketni projektil V-1 (robot-bomba) bio je, u stvari bespilotni srednjekrilac s praskavomlaznim motorom, bez elerona, ali sa običnom konstrukcijom trupa i repa. Njime je upravljano pomoću aparature koja se nalazila u projektilu, a koja je radila na principu stabilizacije pomoću žiroskopa, dok je vođenje vršeno pomoću kompasa. Lansiran je sa rampe duge 46 m a višoke, u najvišoj tački, 5 m. Da bi motor mogao da održava raketu u letu, bilo je potrebno da ona postigne brzinu od oko 320 km na čas. Raketa je nosila bojnu glavu težine 893 kg.

Projektil V-1 (oružje za odmazdu broj 1) nije bio dovoljno tačan, a mogao se i lako uništavati vatrom protivavionske artiljerije i avionskom vatrom. Ipak su ometanja u funkcionišanju za rat tako važnog centra kakav je bio London, kao i razaranja, učinili V-1 efikasnim sredstvom psihološkog dejstva.

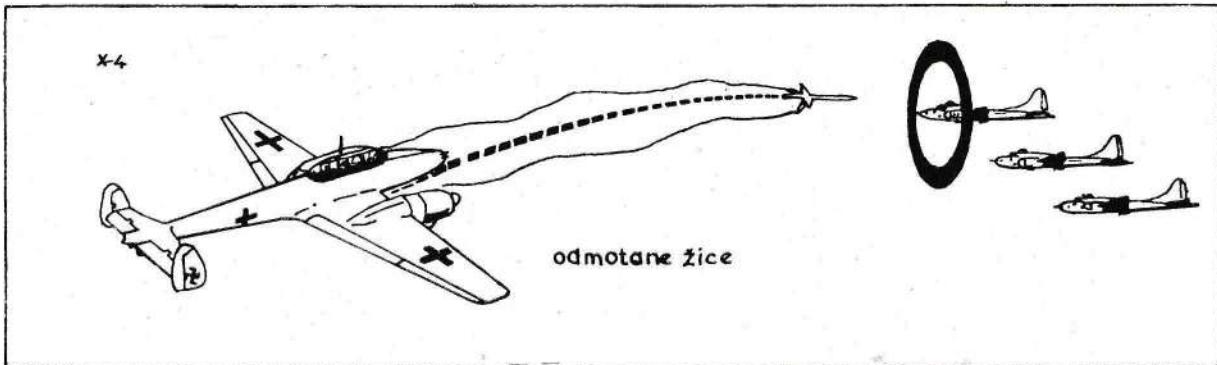
V-2 (oružje za odmazdu broj 2) bio je prvi dalekometrični raketni projektil koji se mogao upotrebiti u borbi. Koncentrisani napori za njegovu razradu počeli su 1941. god. Zatim je počela serijska proizvodnja tog projektila. U septembru 1944. god. prvi od njih pao je na Englesku.

V-2 je bio nadzvučni projektil, koji se vertikalno lansirao, da bi se kratko vreme posle lansiranja automatski nagnuo i nastavio let pod uglom od 41 do 47 stepeni. Najveći domet iznosio je oko 320 km, a najveća brzina oko 5.300 km na čas. V-2 je bio veliki projektil, dužine 14,28 m, a prečnika 1,65 m. Ukupna težina u trenutku poletanja iznosila je preko 14 tona, uključujući i bojnu glavu težine 750 kg.

Aktivne mere protiv V-2 nisu postojale. Izuzev na delu putanje do naginjanja, V-2 je leteo kao slobodno zrno veoma velike brzine.

U toku II svetskog rata daleko se odmaklo u radu na izradi još pet tipova nemačkih projektila. Pri kraju rata oni su se nalazili u raznim fazama ispitivanja.

Jedan od njih, »rajinbote« (*Rheinbote*), bio je takođe projektil u klasi zemlja — zemlja. Ovaj trostopeni raketni projektil poletao je uz pomoć bustera. Njegov je domet bio oko 220 km. Treći stepen dostizao je 25 sekundi posle izbacivanja,



Sl. 1 — Izbacivanje raketa X-4

brzinu od preko 5200 km na čas. Ukupna dužina projektila iznosila je oko 11 m. Pošto bi se odbacili zadnji delovi na kraju prvog i drugog stepena, bio je dugačak samo 4 m. Taj deo, treći stepen, nosio je trenutno-fugasnu bojnu glavu težine 40 kg.

»Vaserfal« (Wasserfall) je bio nadzvučni projektil klase zemlja — vazduh, koji se vodio radio-putem. Po opštim principima rada, bio je sličan projektilu V-2. Ukupna težina iznosila je nešto manje od 4 tone, a dužina 7,65 m. Namjenjen za presretanje aviona, ovaj projektil mogao se primenjivati na visini do 20.000 m, a imao je brzinu 900 km na čas i domet do 50 km. Njegova bojna glava, težine 90 kg, trebalo je da se aktivira pomoću radio-upaljača, pošto bi se putem radio-komandi vođenja dovela do cilja. On je takođe trebao da bude snabdeven uređajem za samonavođenje u fazi neposrednog približavanja ka cilju i infracrvenim blizinskim upaljačem, za aktiviranje bojne glave u najpogodnijoj tački susreta sa ciljem. Pogonsku snagu trebalo je da dobija od motora sa tečnim gorivom koje se iz tankova istiskivalo azotom.

Drugi projektil zemlja — vazduh »šmeterling« (Schmetterling), ili HS-117, bio je pri završetku rata još u fazi razrade. Sav metalne konstrukcije, imao je dužinu 4 m, a raspon krila 2 m. Uspešan domet protiv niskoletećih ciljeva bio je 16 km. Kretao se brzinom 870 km na čas na visinama do 11.000 m. Za aktiviranje bojne glave težine 25 kg trebalo je da upotrebljava blizinski upaljač. Pogonska sila dobijala se od raketnog motora sa tečnim gorivom, s tim da se prilikom poletanja koristi i snaga dva raketna buster-a. Lansiranje se imalo vršiti s platforme, koja se mogla naginjati i okretati prema cilju.

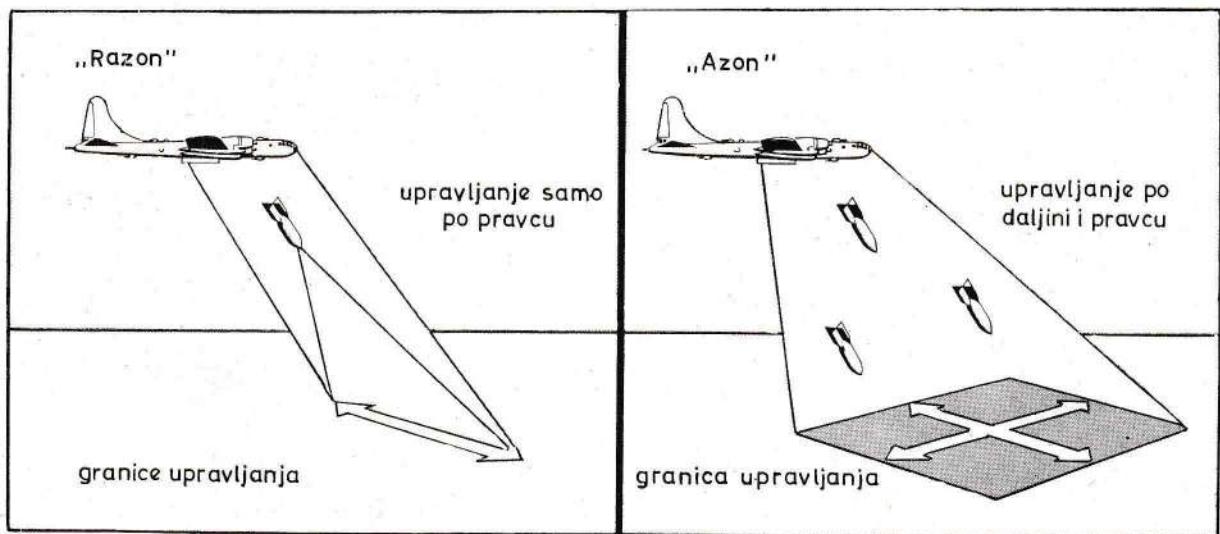
Treći nemački projektil zemlja — vazduh bio je »encijan« (Enzian), namenjen za nošenje eksplozivnog punjenja težine do 450 kg. Trebalo je da se primenjuje protiv formacija teških bombardera. »Encijan« je bio dugačak oko 3,65 m.

Imao je raspon krila približno 4,3 m, a težio je pred start nešto preko dve tone. Pogonsku snagu davao je raketni motor sa tečnim gorivom, kojem su prilikom lansiranja pomagala četiri raketna buster-a sa čvrstim gorivom. Lansiranje se, kao i u slučaju »šmeterlinga«, izvodilo sa rampe koja se mogla okretati po pravcu i vertikalnom uglu. Domet ovog projektila bio je oko 26 km, brzina 900 km na čas, a najveća visina leta 14.500 m. Kod ovog projektila bio je primenjen sistem komandnog vođenja. Predviđeno je da projektil ima žiroskopsku stabilizaciju u odnosu na uzdužnu osu.

Nemački projektil vazduh — vazduh »X-4« bio je napravljen za lansiranje iz lovačkog aviona, kako je to pokazano na sl. 1. Pokretan raketnim motorom sa tečnim gorivom, on se stabilizovao pomoću četiri simetrično raspoređena krila. Dužina mu je bila oko 2 m, a raspon krila oko 0,76 m. Domet projektila iznosio je nešto preko 2,4 km, a brzina 960 km na čas na visini od 6400 m. Vođenje se ostvarivalo električnim impulsima koji su se prenosili iz lovačkog aviona kroz dva tanka provodnika. Provodnici su se odmotavali sa dva kalema postavljena na krajevima dva suprotna krila projektila. Ovaj je projektil bio razraden, ali nije nikada primenjen.

VOĐENI PROJEKTILI SJEDINJENIH AMERIČKIH DRŽAVA IZ II SVETSKOG RATA

Podstrek za izradu raketa u SAD za vreme II svetskog rata dat je 1941. god. Te godine Komanda armijskog vazduhoplovstva obratila se Nacionalnom komitetu za odbrambena istraživanja sa zahtevom da se počne izrada bombe koja bi se bacala iz aviona, s tim da se posle toga može njome upravljati. Komitet je započeo s realizacijom programa za izradu planirajućih bombi, pa je tako stvorena fugasna planirajuća bomba težine 900 kg, kojom se moglo upravljati



Sl. 2 — Granice upravljanja bombama »azon« i »razon«

sa daljine. »Azon«, vertikalno padajuća bomba, kojom se moglo upravljati samo po pravcu, bila je puštena u proizvodnju 1943. god. Rad na izradi »razona«, bombe kojom se moglo upravljati i po pravcu i po daljini, počet je 1942. god., ali nije završen do kraja rata. Granice u kojima se moglo upravljati bombama »azon« i »razon« pokazane su na slici 2. U to vreme radilo se još na izradi planirajuće bombe »ROC«, koja se izbacivala pod srednjim uglom, i bombe »tarzon«, koja je bila teška 550 kg. Njima se upravljalo i po pravcu i po daljini. U II svetskom ratu ove bombe nisu bile gotove za borbenu upotrebu. Rad na projektu »tarzon« obustavljen je 1946. a nastavljen 1948. god. »Tarzon« je uspešno upotrebljavan u korejskom ratu.

Godine 1943. započet je rad na izradi planirajućeg torpeda. Kao osnova za taj projekt uzepta su obična pomorska torpeda. Poslednjih dana rata ta planirajuća torpeda bila su upotrebljena na pacifičkom bojištu.

U 1944. god. Amerikanci su ovim bombama napali nemački grad Keln. Većina bombi dospela je u rejon cilja. Te iste godine razrađena je i stavljena na bombardere aparatura za televizijsko upravljanje sa daljine. Ti su avioni upotrebljavani za vođenje bombardera natovarenih eksplozivom, koji više nisu bili za upotrebu. Ovi bombarderi, vođeni pomoću radija, došli su do izvesnog izražaja u akcijama protiv Nemačke poznatim pod imenom »Veri Vili« (Weary Willie). Do 1945. god. izrađene su i ispitane optičke i radarske aparature za samonavođenje planirajućih bombi.

Prva američka bomba sa mlaznim motorom bila je tipa letećeg krila i njome se upravljalo pomoću radija; druga varijanta bombe s mlaznim motorom bila je kopija nemačke bombe V-1 s nekoliko poboljšanja, treći model predstavljao je kombinaciju prva dva modela, dakle letećeg krila i praskavomlaznog motora bombe V-1. Rad na njemu, kao zastareлом, obustavljen je 1946. god. U to vreme izrada vazduhoplovog, vođenog projektila nazvanog »tiamat« dosegla je takav stepen da se pristupilo ispitivanju njegovih opitnih modela.

Pri kraju rata mornarica se bavila izradom nekoliko vođenih projektila. Jedan od njih, »gar-gojl« (Gargoyle), bio je vazduhoplovna planirajuća bomba sa reaktivnim motorom i traserom za vizuelno praćenje, i tom bombom se upravljalo pomoću radija. Mornarica je imala i planirajuću bombu zvanu »glomb«. Ona je vođena ka cilju pomoću radija, uz pomoć televizije. Bomba »lun« (Loon), modifikovana nemačka bomba V-1, bila je namenjena za dejstvo s broda na obalu i za ispitivanje elemenata vođenih projektila. Drugi projektil, poznat pod imenom »gorgon II C«, upotrebljavao je nabojnomlazni motor. Njime se upravljalo pomoću radija, uz praćenje radarom.

Za vreme rata ovo oružje užurbano je izrađivano, da bi se što pre upotrebilo. Kad se rat završio, 1945. god., skoro sve do čega se bilo došlo u pogledu razvoja vođenih projektila, vođenih bombi i vazduhoplovnih vođenih projektila smatralo se zastarelim, pa su formulisani novi taktičko-tehnički zahtevi za njihovu izradu, a pri tom se imala na umu perspektiva razvoja te vrste oružja.

RAD NA IZRADI I KLASIFIKACIJI VODENIH RAKETA

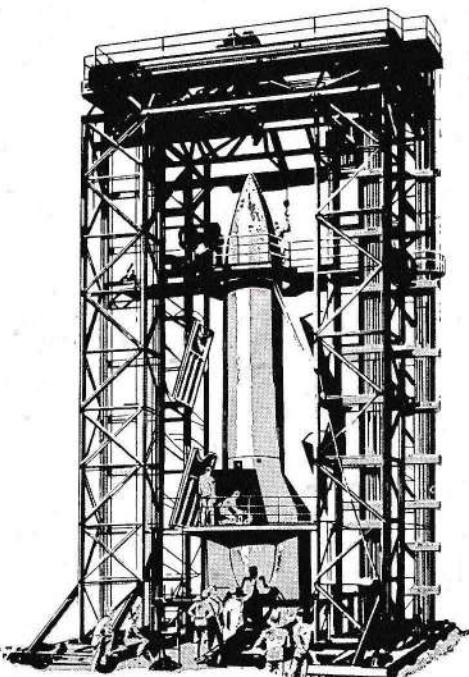
Pri kraju II svetskog rata počela se obraćati velika pažnja na dalekosežne mogućnosti vodenih projektila. Neposredno posle završetka rata, Armijsko vazduhoplovstvo počelo je rad na oствarivanju širokog programa razvoja vođenih projektila. Njegova politika u tom pogledu, kako je rečeno u februaru 1946. god., bila je:

»... da se poboljšanje ili modifikacija postojećih vodenih projektila ograniči samo na primenu takvih novih otkrića, koja će umnogom poboljšati njihove karakteristike, ili na ugradivanje takvih elemenata za koje postoji izgled da će imati definitivnu primenu u budućim vođenim projektilima. Izuvez tih krajnje ograničenih poboljšanja, koja se mogu pokazati poželjnim da se unesu u postojeće vodene projektile, naučnoistraživački rad na vodenim projektilima u Armijskom vazduhoplovstvu usmerava se na razjašnjavanje mnogih stvari koje su danas nepoznate, sa ciljem da se dođe do razumne odluke kako u pogledu logičnog prilažena pitanjima budućih raketnih snaga, tako i u pogledu potrebnih tipova raketnog oružja.«.

Kasnije je taj program drastično ograničen zbog prelaska na mirnodopski budžet, potrebe čuvanja ograničenog broja tehnički kvalifikovanog ljudstva i ograničenja u pogledu snabdevanja materijalom. Ranije zaključeni ugovori za izradu međutipova vođenih projektila bili su poništeni i potpisani novi. Rad na tim tzv. projektilima obezbeđenja trebalo je da traje dok ne budu napravljeni dalekometni i nadzvučni projektili.

Sada se ulažu veliki napori za proučavanje pojava koje se javljaju pri letu nadzvučnim brzinama, uslova u gornjim slojevima atmosfere i osnovnih problema u vezi s pogonom, upravljanjem, elektronikom, vođenjem i lansiranjem projektila. Danas se izrađuju ili su već izrađeni razni tipovi vođenih projektila zemlja — vazduh, vazduh — zemlja, vazduh — vazduh, zemlja — zemlja i vazduh — pod vodu. Neki primerci takvih projektila pokazani su na slikama uz tekst.

Program istraživanja i rada na izradi izvensnog projektila počinje od obrazloženja koliko je neophodna izrada ovog ili onog tipa i koji se zadatak želi njime rešavati. Na osnovu toga određuju se dimenzije, domet, brzina i tačnost projektila. Svaki tip projektila ima izvesne karakteristike koje, s vojne tačke gledišta, imaju poseban značaj. Tačnost i brzina su dve osobine koje na svim listama prioriteta zauzimaju visoka mesta. Ni za jedan projektil ne može se reći da je uspeo ako se njime ne može pogoditi cilj sa toliko tačnosti koja bi opravdala novac,



Sl. 3 — Priprema rakete za izbacivanje

ljudsku snagu i materijal utrošen za njegovu izradu. Brzina koja je dovoljno velika da se izbegne otkrivanje leta projektila, ili bar da projektil ne bude osetljiv na protivmere takođe je važna karakteristika.

Sigurnost u radu vođenog projektila može se postići a zatim održavati jedino ako se brojni sastavni delovi projektila podvrgavaju temeljitim ispitivanjima. Isto tako, mora se utvrditi koeficijent sigurnosti s obzirom na razliku između borbenih uslova i uslova pod kojima se vrši ispitivanje. Na sličan način moraju se ustanoviti krajnji uslovi pri kojima prestoji da funkcionišu pojedini delovi.

Program razrade elemenata projektila zasniva se na jasnom shvatanju njihove namene i na težnji da se savladaju teškoće koje prate razvoj vođenih projektila još od početka. Ispitivanja su pokazala, na primer, da su raketni motori sa tečnim gorivom najbolje pogonske mašine za nadzvučne projektile koji lete na velikim visinama, da su motori sa čvrstim gorivom nezamenljivi kao busteri, da su turbine i drugi mlazni motori pri radu ekonomičniji, ali da su komplikovaniji za izradu i da koštaju više i, najzad, da nabojnomlazni motori obećavaju mnogo što se tiče leta na visinama do 21.000 m. Kod uređaja za lansiranje postoji problem ubrzanja nadzvučnih projektila do potrebnih brzina, što se obično postiže primenom busteru teških mnogo tona.

PROCES IZRADE ELEMENATA VOĐENOG PROJEKTILA

Pre nego što objasnimo tok izrade izvesnog elementa opreme, pogledajmo u organizacijsku shemu organa koji u tome radu učestvuju.

Organizacija naučno-istraživačkog rada. Shema na slici 5 pokazuje odnose po štapskoj i komandnoj liniji koji postoje između svih organa za istraživanje i razvoj. Debele crne linije pokazuju neposredni lanac komandovanja, počev od ministra odbrane pa do raznih komandi. Tankе linije pokazuju vezu između pojedinih štapskih lica i štapskih organa.

U Ministarstvu odbrane pomoćnik ministra odbrane za istraživanja i konstrukcije odgovara za celokupni vojnoistraživački i vojnokonstruktorski rad. On utvrđuje politiku razvoja, rešava sporove između organa odgovornih za razvoj u određenim oblastima i rukovodi raspodelom novčanih sredstava namenjenih za istraživanje i razvoj. Njemu pomaže Grupa za ocenu oružja, koja tesno saraduje sa Odborom načelnika štabova i nizom tehničkih koordinacionih ko-

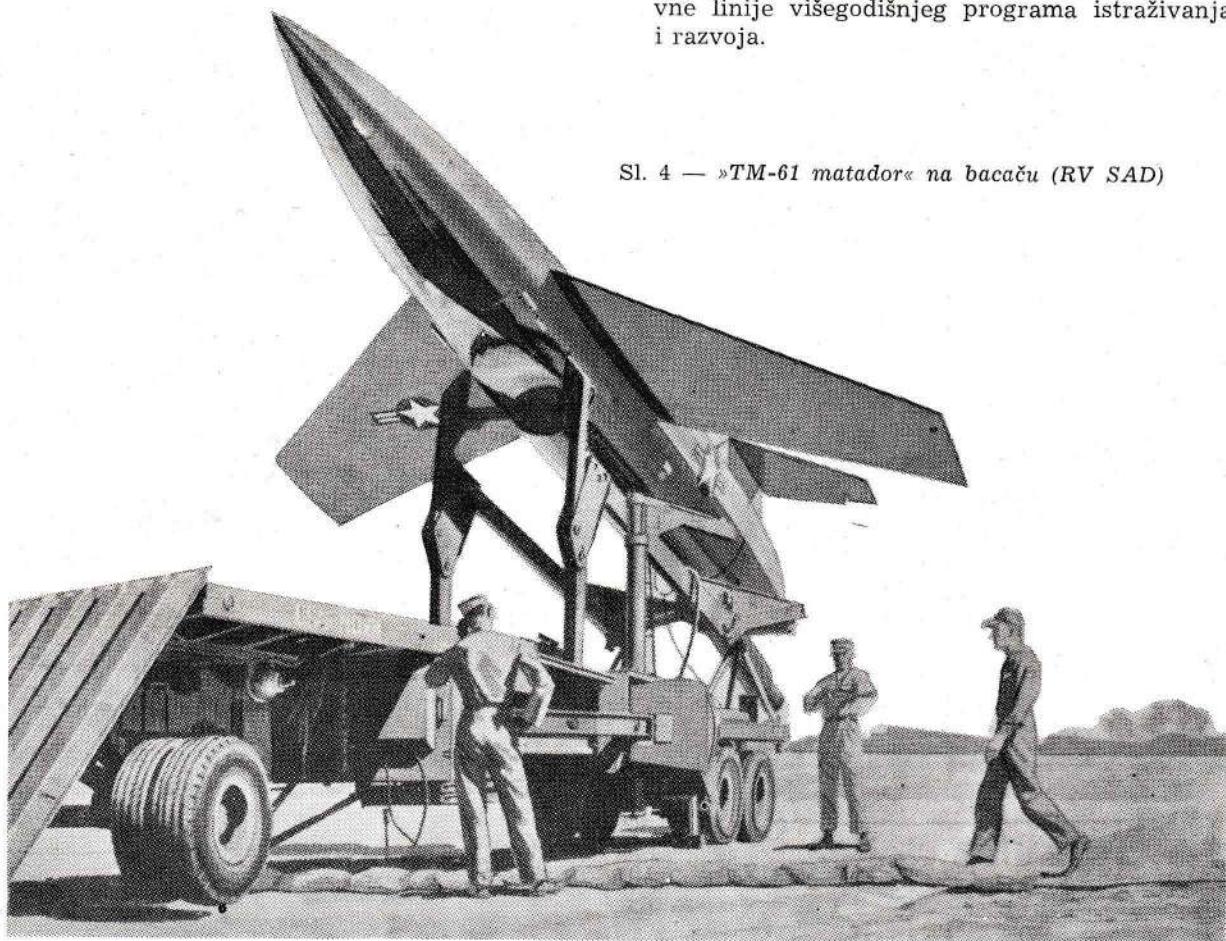
miteta koji imaju savetodavnu ulogu. Ministar odbrane ima i posebnog pomoćnika za vođene projektile.

Ministar Ratnog vazduhoplovstva ima pomoćnika za istraživanje i razvoj. Uočite da načelnik štaba ima Naučnu savetodavnu komisiju koja mu daje stručno mišljenje o svim mogućim tehničkim pitanjima i pomoćnika za vođene projektile koji se bavi pitanjima izrade programa rada na vođenim projektilima.

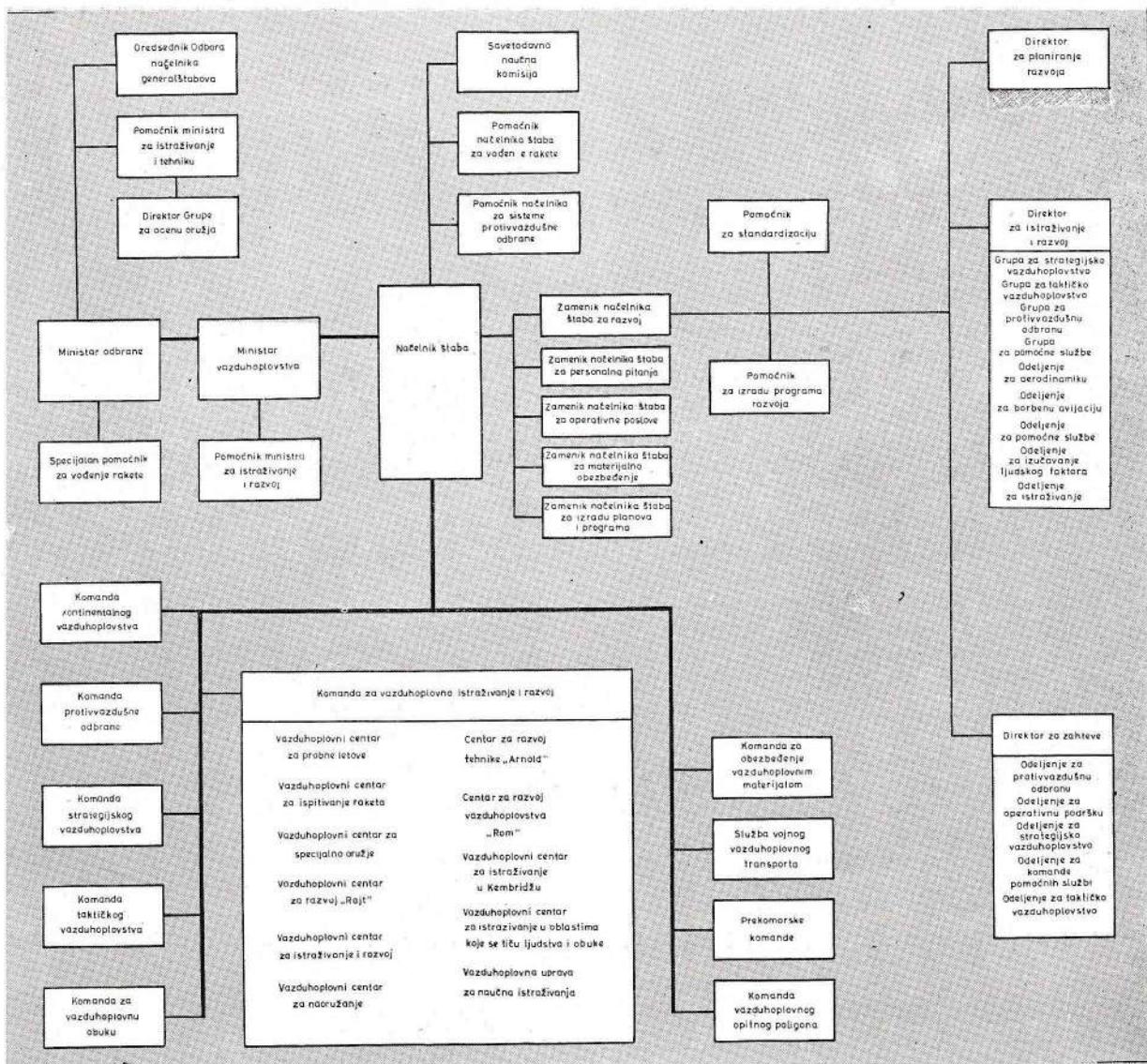
Zamenik načelnika štaba za razvoj je glavni savetnik načelnika štaba u pitanjima koja se tiču razvoja opreme. Treba, međutim, podvući da je delokrug njegovog rada znatno širi nego što je sam razvoj opreme. On je zadužen za organizaciju rada, raspodelu budžetskih sredstava, iskorišćenje kadrova i izradu planova i programa.

Njegov pomoćnik za izradu programa razvoja sastavlja budžet, rukovodi finansijskim poslovanjem i bavi se pitanjima unapređenja rada na području razvoja.

Direktor uprave za izradu planova bavi se pitanjima perspektive razvoja i utvrđuje osnovne linije višegodišnjeg programa istraživanja i razvoja.



Sl. 4 — »TM-61 matador« na bacaču (RV SAD)



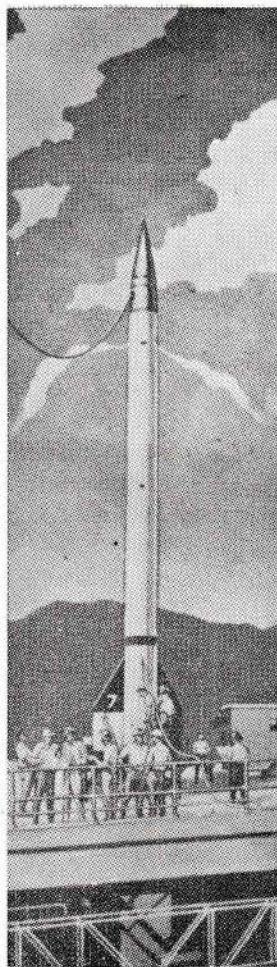
Sl. 5 — Shema organizacije organa za istraživanje i razvoj vazduhoplovstva SAD

Direktor uprave za istraživanje i razvoj vazduhoplovstva je organ Štaba vazduhoplovstva, pod čijom je najneposrednjom kontrolom Komanda za istraživanje i razvoj. On ima pod sobom grupe, koje su odgovorne za razvoj opreme iz raznih oblasti, odeljaka i grana, koje odgovaraju glavnim tehničkim područjima istraživanja i razvoja vazduhoplovstva, kao što su strategijsko oružje, tehničko oružje, sredstva protivvazdušne odbrane, oprema za razne pomoćne službe itd. Pod njim su takođe Odeljenje za izučavanje ljudskog faktora i Odeljenje koje se bavi čisto naučnim istraživanjima.

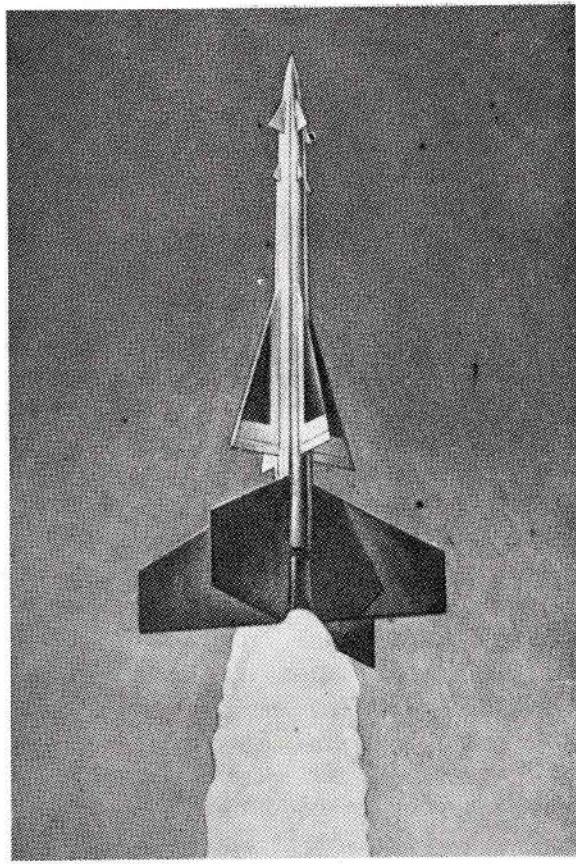
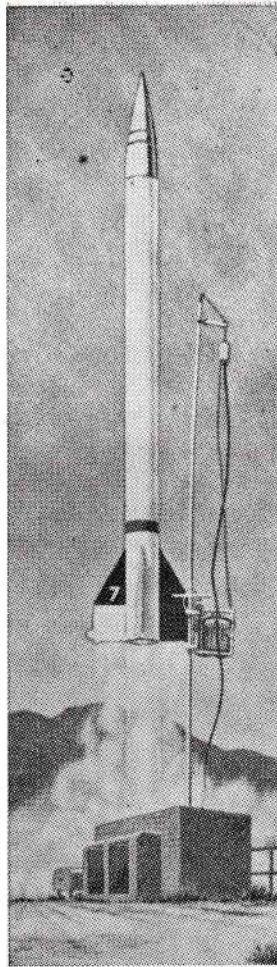
Uprava za zahteve organizovana je prema zadacima. Kao što pokazuje shema organizacije,

ta uprava obuhvata odeljenja za taktičko vazduhoplovstvo, strategijsko vazduhoplovstvo, protivvazdušnu odbranu, operativnu podršku i pomoćne službe. Ona utvrđuje zahteve kojima treba da odgovore nova oprema, novi metodi, novi postupci itd. i predaje te zahteve Upravi za istraživanje i razvoj koja treba da preduzme mera za njihovo ispunjenje. Direktor Uprave za zahteve kontroliše rad Komande vazduhoplovog opitnog poligona, gde se novi modeli ispituju da bi se utvrdilo da li odgovaraju operativnim zahtevima.

Komanda za vazduhoplovna istraživanja i razvoj je velika operativna komanda koja prima uputstva od načelnika štaba vazduhoplov-



Sl. 6 — Vođena raketa »vajking« (RM SAD)



Sl. 7 — Vođena raketa »najk« (Nike), KoV SAD

stva, obično preko njegovog pomoćnika za razvoj, ili preko direktora Uprave za ispitivanje i razvoj. Iz sheme organizacije se vidi da se pod tom komandom nalazi niz centara, kao što su Centar za probne letove i Centar za vazduhoplovni razvoj »Rajt«, gde se stvarno izrađuju novi modeli. Ona takođe zaključuje ugovore s preduzećima za razradu pojedinih artikala opreme.

Rad na izradi modela. Proces toga rada obično započinje u trupi, kad neka operativna komanda oseti potrebu za nekim novim predmetom opreme. Taj se zahtev šalje Upravi za zahteve koja ga procenjuje i sastavlja formalan operativni zahtev koji se dostavlja Upravi za istraživanje i razvoj. Ova uprava određuje najbolji put za zadovoljenje postavljenog zahteva, pa to rešenje uklapa u opšti program. Posle toga, direktor Uprave šalje direktoru za razradu Komande za vazduhoplovna istraživanja i razvoj.

Kad je reč o modelu nekog krupnog sredstva, Uprava za istraživanje i razvoj i Komanda za istraživanje i razvoj posmatraju taj model kao jedinstven sistem i s te tačke gledišta pristupaju njegovoj izradi. Komanda za istraživanje i razvoj stalno nastoji da ima pun uvid u tok te izrade, kako bi se obezbedilo da se ceo sistem isporuči u predviđeno vreme. Ona počinje s ispitivanjem čim zaključi da postoji nešto što odgovara postavljenom zahtevu. Kad se dobije pozitivan rezultat, komanda o kojoj je reč predaje ispitani proizvod Upravi za zahteve. Posle toga, Centar za operativno ispitivanje isprobava izrađeni sistem u Vazduhoplovnoj bazi Eglin, da bi se videlo da li odgovara operativnim zahtevima. Ako odgovara, usvaja se i pušta u proizvodnju. Najzad, gotov se predmet upućuje u jedinice i time završava ciklus.

Organi koji imaju veze s radom na izradi novih modela opreme za potrebe vazduhoplovstva pokazani su na shemi na strani 17. Debele

linije označavaju direktni lanac kontrole. Tanke linije pokazuju dalje grananje kontrole ka pojedinim organima vazduhoplovstva koji stvarno istražuju i ocenjuju.

Uočite da shema pokazuje da je u središtu celokupne mreže organa zamenik načelnika Štaba za razvoj.

Program ispitivanja projektila obuhvata tri faze: ispitivanje pre leta, koje se sastoji od serija ispitivanja svakog sastavnog dela i projektila kao celine; ispitivanje u toku leta, koje obuhvata proveru lansiranja, aerodinamičke stabilnosti, letnih karakteristika, ponašanja za vreme vođenja i učinka na cilju; ispitivanje pod stvarnim uslovima, što čine trupne jedinice. Sastavne delove obično izrađuju razni kooperanti vazduhoplovne industrije, kao što su kompanije za elektroniku, laboratorije za istraživanja i univerziteti. Pošto se delovi sklope za ispitivanje pod realnim uslovima leta, probni model se šalje na jedan od opitnih poligona.

KLASIFIKACIJA VOĐENIH PROJEKTLILA

Da bi se rakete sistematski proučavale, potrebno je da se one na prost način označe i klasifikuju.

U američkom vazduhoplovstvu rakete se klasifikuju na dva načina. Najuobičajeniji način upotrebljava slovo »A« za vazduh (*air*), slovo »S« za površinu (*surface*) Zemlje i slovo »U« ispod vode (*under water*). Ta su slova upotrebljena u dole navedenoj klasifikaciji. Prvo u njoj označava mesto lansiranja, a drugo mesto cilja. Ta dva slova, zajedno sa slovom »M«, koje znači raketa (*missile*), služe za klasifikaciju raketa prema njihovoj nameni. Dakle:

SAM — znači projektil zemlja — vazduh
AAM — znači projektil vazduh — vazduh
ASM — znači projektil vazduh — zemlja
SSM — znači projektil zemlja — zemlja
AUM — znači projektil vazduh — ispod vode
SUM — znači projektil zemlja — ispod vode
USM — znači projektil ispod vode — zemlja
UAM — znači projektil ispod vode — vazduh

U ovom sistemu klasifikacije projektila, a njega upotrebljava samo jedan vid oružanih snaga SAD, označavaju se početnim slovom imena tog vida koje se stavlja odmah iza slova što označavaju klasu projektila, a između tih dveju oznaka stavlja se crtica. Slovo »A« znači vazduhoplovstvo (*Air Force*), »N« — mornarica (*Navy*), a »G« — kopnena vojska (*Ground Force*). Ako projektil upotrebljavaju dva ili sva tri vida, onda se stavlja odnosno slovo svakog od tih vidova. Npr. ako su u pitanju sva tri vida, na projektilu će stajati oznaka »ANG«.

Modeli projektila se numerišu počev od broja 1. Iza broja modela može doći i malo slovo, koje označava svaku narednu modifikaciju. Oznaka modela dolazi posle slova koje označava ko projektil upotrebljava, na primer: ASM-G-3c, gde 3c znači i broj modela (3) i koja je ovo modifikacija po redu (c, dakle treća).

Projektili u stadijumu istraživanja i razrade, na ispitivanju u trupi, u naoružanju ili povučeni iz naoružanja označavaju se na sledeći način: slovo »X« znači eksperimentalni projektil, »Y« — projektil na ispitivanju u trupi, a »Z« — projektil povučen iz naoružanja. Ta slova, kad se upotrebije, prethode osnovnoj klasifikaciji. Projektil u naoružanju ne označava se nikavim prefiksom.

Ako projektil služi za izvođenje opita, njegova oznaka je »TV« (*test vehicle*), a iza nje dolazi slovo koje označava vid oružanih snaga čiji je projektil, broj modela i slovo koje označava redni broj modifikacije. Slovom koje prethodi njegovoj oznaci kao opitnog sredstva označava se šta se ispituje tim projektilom:

A — znači aerodinamika (*aerodynamics*)
C — znači sistem upravljanja (*control*)
L — znači uređaj za lansiranje (*launching*)
P — znači pogonski uređaj (*propulsion*)

R — znači ispitivanje u cilju istraživanja (*research*); obuhvata i rakete za ispitivanje atmosfere na velikim visinama.

Ponekad se kao projektili za ispitivanje raznih raketnih sistema upotrebljavaju obični avioni. U takvim slučajevima ispred standardne oznake aviona stavlja se slovo »M«, što znači da se taj avion upotrebljava u ulozi opitnog projektila.

Ako su obični avioni preudešeni da služe za kontrolu leta i vođenje projektila, onda se ispred standardne ili osnovne oznake aviona stavlja slovo »D«, što označava njegovu namenu (*Director*).

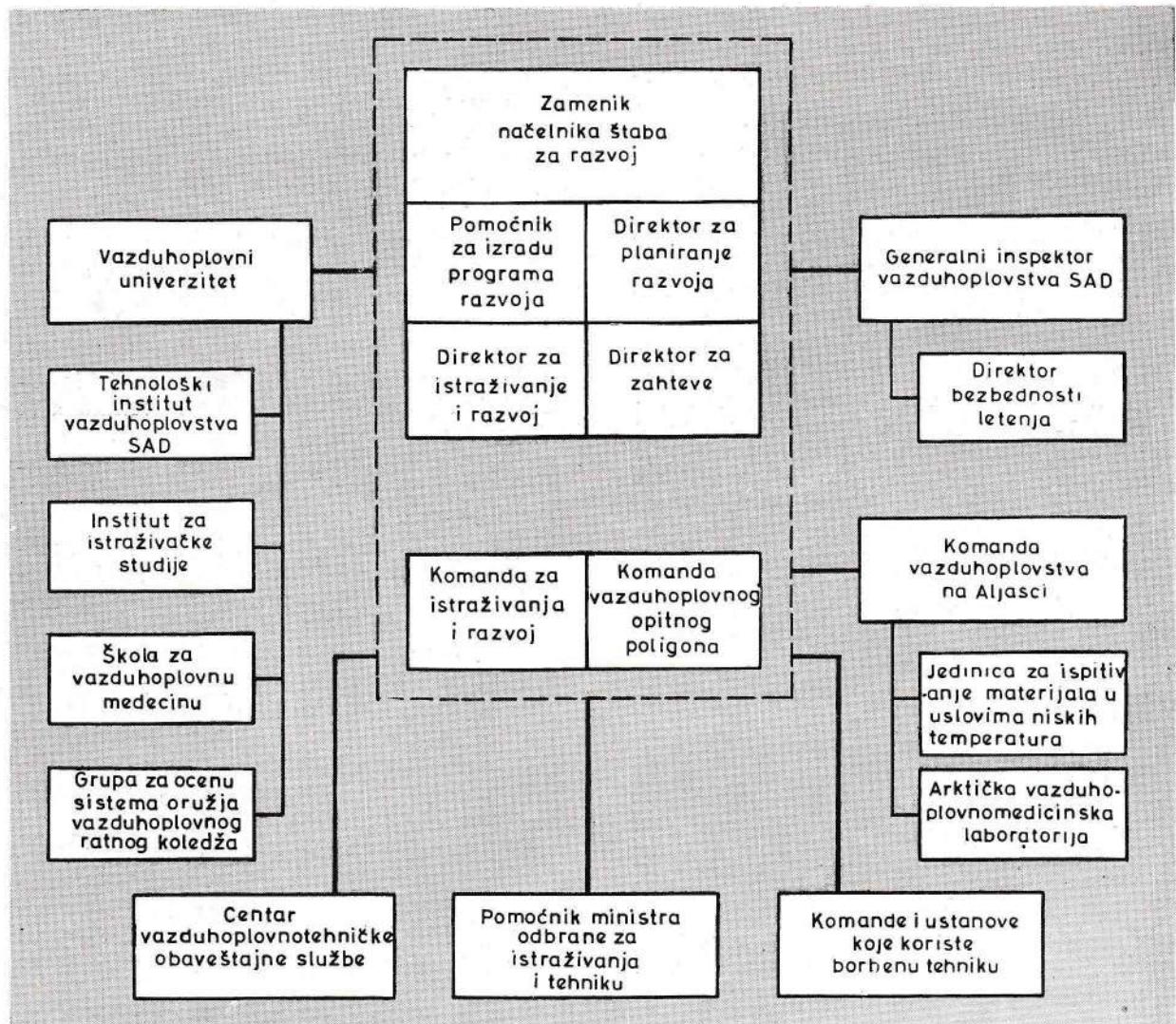
Evo nekoliko primera klasifikacije projektila:

ASM-G-3c — projektil vazduh — zemlja, upotrebljava ga kopnena vojska, model tri, treća modifikacija, nalazi se u naoružanju.

XSSM-A-1B — eksperimentalni projektil zemlja — zemlja, upotrebljava ga vazduhoplovstvo, model jedan, druga modifikacija.

YAAM-N-2d — projektil vazduh — vazduh, nalazi se na ispitivanju u trupi, upotrebljava ga mornarica, model dva, četvrta modifikacija.

»Lark« CTV-N-9b — Lark (*ševa*, ime projektila), opitni projektil za ispitivanje sistema upravljanja, upotrebljava ga mornarica, model devet, druga modifikacija.



Sl. 8 — Ustanove koje učestvuju u radu na opštem razvoju vazduhoplovstva

DF-80 — lovac F-80 koji se upotrebljava kao stanica za vođenje projektila (»director«) (obično se zove avion za nagonjenje).

Najnovija klasifikacija koju je usvojilo vazduhoplovstvo ima sledeće oznake: TM-62, SM-62, SM-64, SM-65, IM-99, GAR-1 i GAM-63. TM znači tehnički projektil; SM — strategijski projektil; IM — projektil za presretanje; GAR — vazduhoplovna vođena raketa; GAM — vazduhoplovni vođeni projektil.

Drugi način klasifikacije projektila predviđen je propisom »Vođeni projektili vazduhoplovstva Sjedinjenih Američkih Država« (publikacija AFL 136-3 od 18. septembra 1952). Po ovoj klasifikaciji vođeni projektili podeljeni su, u prilično širokom smislu, u tri grupe: tip bombardera B-61 (SSM), tip lovca F-99 (SAM) i vazdu-

hoplovne vođene rakete kao što su GAR-1 (AAM).

U vazduhoplovstvu je odavno uobičajeno da se raznim tipovima aviona, uz njihove tehničke oznake, daju popularna imena. Za projektile su dozvoljene sledeće grupe popularnih imena:

AAM — krilata stvorenja (izuzev ptica grabljivica i pernate divljači)

ASM — ptice grabljivice

SAM — mitološka imena

SSM — astronomski nazivi

Vazdušne mete — pernata divljač i lovački nazivi.

Izuzeći u ovom sistemu grupisanja su projektili koji su dobili ime pre usvajanja sistema; oni su zadržali svoja prvobitna imena. Primer takvog izuzetka je projektil »lark«.

U vođene projektili spadaju još eksperimentalni leteći aparati i vazdušne mete. Eksperimentalni leteći aparati su uglavnom obični avioni, kojima se upravlja sa aviona-matice. Vazdušne mete su obične konstrukcije, izuzev u pogledu dimenzija. Tipična vazdušna meta je OQ-19, koja ima raspon krila od oko 3,6 m. Ta-kva meta se upotrebljava za vežbanje posada u izvođenju vazduhoplovnih gađanja.

Mada se načini klasifikacije koji se niže navode obično ne upotrebljavaju, oni daju mogućnosti dalje podele projektila s obzirom na njihove tipove. Ukratko, projektili se prema njihovim pogonskim uredajima mogu podeliti na one s raketnim motorima, čiji rad ne zavisi od vazduha, i na one s vazdušno-reaktivnim motorima.

Projektili se takođe dele i prema broju Mahovih jedinica, dakle s obzirom na to kolika je brzina projektila upoređena sa brzinom zvuka.

Izrazi »podzvučni«, »zvučni« i »nadzvučni projektil« takođe govore o odnosu brzine projektila prema brzini zvuka.

Ponekad se upotrebljava i klasifikacija s obzirom na sistem vođenja. Po toj klasifikaciji projektili se dele prema tome da li im je sistem vođenja na krajnjem delu putanje aktivvan, poluaktivvan ili pasivan. Svi se oni koriste otkrivanjem izvesnog zračenja od cilja kao sredstvom

za navođenje projektila na cilj. Projektil može automatski da otkrije zračenje koje stvara cilj (pasivni tip sistema samonavođenja), ili da otkrije odbijanje od cilja radarskih signala koje šalje sami projektil (aktivni tip sistema samonavođenja), ili uredaj na zemlji (poluaktivni tip sistema samonavođenja).

Vodeni projektili se mogu klasifikovati i prema dometu na projektile *velikog i malog dometa*. Sadašnja granica za mali domet je 800 km.

Za uspešno i lako vođenje »razgovora stručnim jezikom« potrebno je znati klasifikaciju projektila; onda se može lako razumeti o kojem tipu projektila se govorи kad se kaže XSSM-A-lb.

PROGRES U RAZVITKU VOĐENIH PROJEKTILA

I pored činjenice da se u nizu godina od I svetskog rata nije intenzivno radilo na razvoju vođenih projektila, ipak je na tom području do danas postignut značajan uspeh. Dostignuti rezultati mogu se najvećim delom pripisati nezavisnom istraživanju i razvoju koji je postignut u takvim oblastima kao što su elektronika, raketna tehnika, mlazni motori i aerodinamika. Mada još postoje mnoge teškoće koje se moraju savladati, perspektiva vođenih projektila je takva da će oni biti glavno ratno oružje.

Aerodinamika vođenih projektila

Iscrpno proučavanje kretanja tela u vazduhu i matematička analiza raznih sila koje se pri tome javljaju složen su i dugotrajan posao. To će se prepustiti vazduhoplovnim inženjerima, a izlaganje ovde će se ograničiti samo na osnovne postavke i načela koje obuhvata aerodinamika projektila.

FIZIKA LETA

Prilikom proučavanja aerodinamike, treba poznavati nekoliko osnovnih zakona fizike. Kada se oni znaju, srazmerno je lako primeniti ih na određene probleme aerodinamike projektila.

U osnovu, aerodinamika projektila ista je kako za dozvučni, tako i za nadzvučni let. Može se, čak, ići i dalje pa reći da je, uopšte uzev, aerodinamika ista za svako telo namenjeno letenju. Drugim rečima, da bi letela, svaka letelica treba da se uskladi sa aerodinamičkim zahtevima. Međutim, zbog naglog napretka u postizanju sve većih brzina i visina, neprestano iskrasavaju nova shvatanja i pitanja, kao što je problem takozvanog udarnog talasa koji nastaje kada se postigne brzina zvuka (zvučna brzina). Problemi koji se odnose na kiseonik i zagrevanje javljaju se na velikim visinama.

Najpre ćemo razmotriti pojave koje su zajedničke i za dozvučne i za nadzvučne brzine. Pitanja, pak, u vezi sa letom na velikim visinama raspraviće se kasnije, kada se na njih bude naišlo.

RELATIVNOST KRETANJA

Za početak, bilo bi korisno da se upoznaju neke od sile koje deluju na telo koje se kreće kroz vazduh. Kada se posmatra jedno takvo te-

lo, na primer, let aviona iznad nas, izgleda kao da je vazduh nepokretan. U tom slučaju izgleda kao da sila koja se suprotstavlja i deluje na telo u letu nastaje usled brzine tela koje se kreće kroz vazduh, kako to prikazuje slika 9.

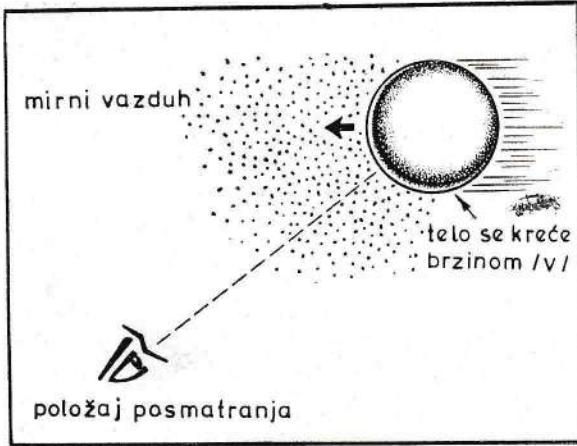
Međutim, kada bismo se nalazili na samom telu, činilo bi nam se kao da stojimo mirno a masa vazduha da se kreće u odnosu na nas. Ovakvo stajanje predstavljeno je na slici 10.

U prethodnim primerima stiže se osnovni utisak o *relativnosti kretanja*. Sile kojima vazduh utiče na telo podjednake su u oba slučaja. Ovo pravilo se može postaviti na sledeći način: *Sila kojom deluje vazduh na neko telo ne zavisi od apsolutnih brzina njegovog kretanja, već samo od relativnih brzina koje se među njima javljaju.*

Pri proučavanju aerodinamike služimo se iskustvima, potvrđenim ispitivanjem u aerotunelu, gde je letelica nepomična a vazduh struji velikom brzinom oko nje. To uprošćava proučavanje sile koje dejstvuju na telo letelice i omogućuje da se projektili ispituju kao da zaista lete, iako su nepokretni.

SILE KOJE DELUJU NA PROJEKTIL

Na sve delove tela projektila utiču mnogobrojne sile koje potiču od otpora vazduha, teže, trenja i drugih činilaca. Razmotrimo ponovo telo koje se određenom brzinom kreće kroz vazduh. Pri ovome kretanju se javljaju četiri osnovne sile. Jedna od njih je sila kojom telo dejstvuje na vazduh u toku svog kretanja. Njoj se suprotstavlja sila kojom vazduh za uzvrat deluje na telo. Druge dve sile su: sila koja potiče od teže

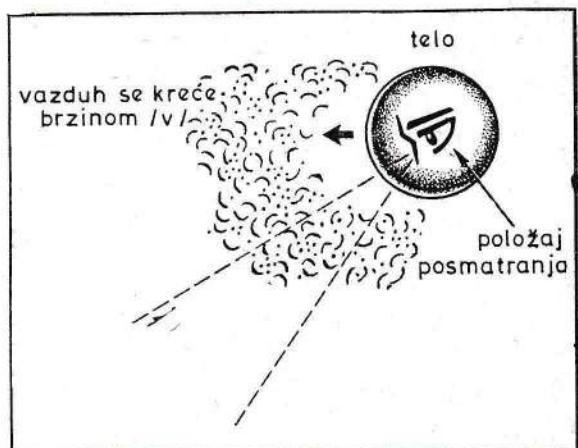


Sl. 9 — Posmatranje sa nepokretnе тачке

koja privlači telo ka zemlji i sile kojom telo deluje u suprotnom smeru, da bi se održalo u vazduhu.

Na slici 11 telo se uopšte ne kreće kada su sile koje deluju jedna protiv druge jednakе. Znači, telo u tom slučaju ostaje u stanju ravnoteže. Ako ma koja od sila koje dejstvuju na telo nije jednakona onoj drugoj, nastaje kretanje u smeru dejstva veće sile. Na primer, na slici 12 prikazano je dejstvo sila na neko telo. Dužine strelici određuju odgovarajuće veličine ovih sile, a same strelice pokazuju smer dejstva tih sila. Slika pokazuje da je sila »A« jednakna i upravljena u smeru suprotnom delovanju sile »B«, sila »C« da je jednakna i suprotна sili »D« a sila »E« veća nego sila »F« koja joj se suprotstavlja. Kao što je tu pokazano, telo će se kretati u pravcu veće sile »E«.

Slika 12 pokazuje primer vektorskog predstavljanja sile koje dejstvuju na neko telo. Ma koliko velik bio broj sila, sile mogu biti vektor-

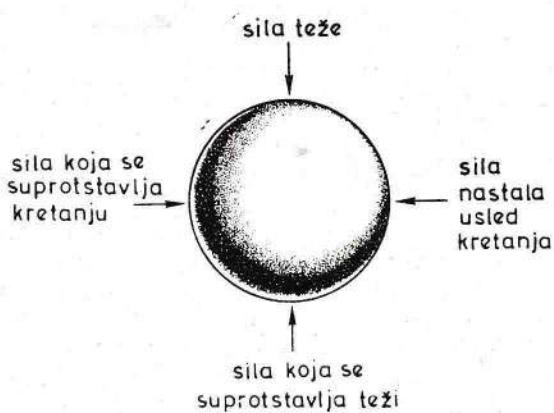


Sl. 10 — Posmatranje sa tela koje se kreće

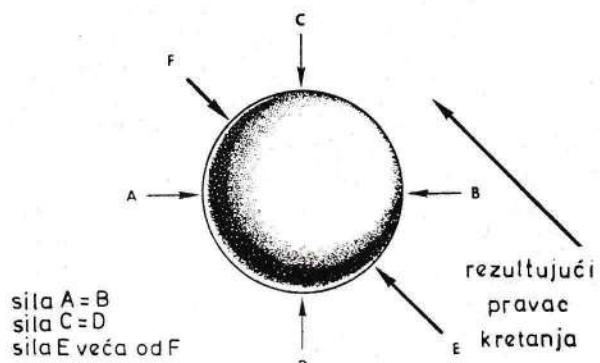
ski predstavljene i mogu se razložiti ili svesti na rezultujuće sile, da bi se ustanovilo na koji način one deluju na telo. Poligoni sile su od bitnog značaja prilikom proračunavanja konstrukcija koje su izložene delovanju raznih sila.

Njutnovi zakoni kretanja. Razmotrimo tri osnovna zakona fizike, poznata pod imenom Njutnovi zakoni kretanja.

Prvi zakon glasi: »Telo koje se nalazi u stanju mirovanja ostaje da miruje, a telo koje se kreće teži da ostane u stanju jednolikog kretanja, sve dok na njega ne počne da deluje neka spoljna sila.« Ovaj zakon, drugim rečima, kazuje da kada nejednakne sile deluju na neko telo, ono mora da se kreće. Pošto se telo jednom pokrene, ono će se kretati sve dok se ne pojavi neka sila koja će promeniti to kretanje. Na primer, ako želimo da gurnemo knjigu na stolu, videćemo da je potrebna izvesna sila za savlađivanje trenja, da bi se ova knjiga pokrenula. Kada bi se mogle



Sl. 11 — Sile koje deluju na telo koje se kreće kroz vazduh



Sl. 12 — Nejednakne sile koje deluju na telo

odstraniti sve sile koje zaustavljaju knjigu, ona bi nastavila da se jednoliko kreće sve dok na nju ne počne da deluje neka spoljna sila. I upravo sa delovanjem tih sila mi ćemo se uglavnom i baviti prilikom proučavanja aerodinamike.

Drugi Njutnov zakon glasi »Veličina promene količine kretanja tela srazmerna je sili koja deluje na telo i ima smer te sile.« Promenom količine kretanja nekog tela može se definisati upravo ona sila kojom se to telo suprotstavlja svakoj promeni kretanja.

Treći zakon glasi: »Svakoj sili akcije suprotstavlja se jednaka i u suprotnom smeru upravljena sila reakcije.« Ovaj zakon pokazuje da se pri svakom dejstvu sile akcije javlja sila reakcije koja deluje u suprotnom smeru u odnosu na tu silu i koja je istovremeno jednaka sa tom silom.

Definicija sile. Sve dosad govorilo se o sili. A šta to upravo znači kada se kaže da »sila deluje«? Uzmimo da se kilogram vazduha kreće u izvesnom pravcu. Kilogram vazduha u stanju je da pri tom proizvede silu. Sila ovog kilograma vazduha upravo je srazmerna njegovoj masi pomnoženoj sa promenom brzine. Ovo se može jednostavno izraziti obrascem:

$$\text{sila} = \text{masa} \times \text{ubrzanje}$$

ili

$$F = m \cdot w$$

Pošto vazduh ima masu, kada ga stavimo u pokret on je u mogućnosti, dakle, da proizvede silu.

Kad god sila dejstvuje duž nekog puta, kaže se da ona vrši rad. Ovo se izražava u jednostavnom obliku:

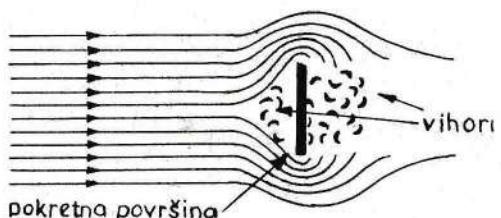
$$\text{rad} = \text{sila} \times \text{predeno rastojanje}$$

ili

$$A = F \cdot s$$

Svaka masa koja se nalazi u pokretu sposobna je da deluje nekom silom i da obavi neki

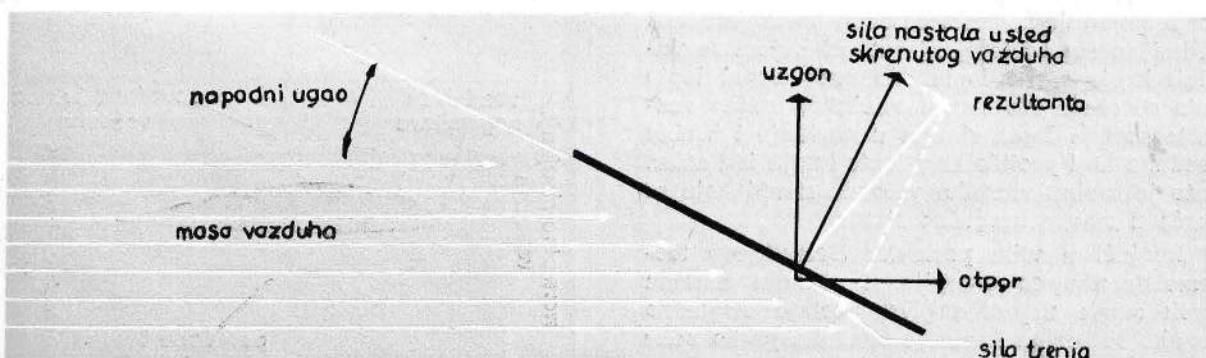
rad. Uvek kada se menja kretanje neke mase nastaje, kako je to već ranije rečeno, promena u količini kretanja. A promena u količini kretanja izaziva uzburkano reagovanje vazduha. Ispitaćemo uticaje izazvane promenom u količini kretanja vazduha, proučavajući različite oblike površina i vazdušnog strujanja.



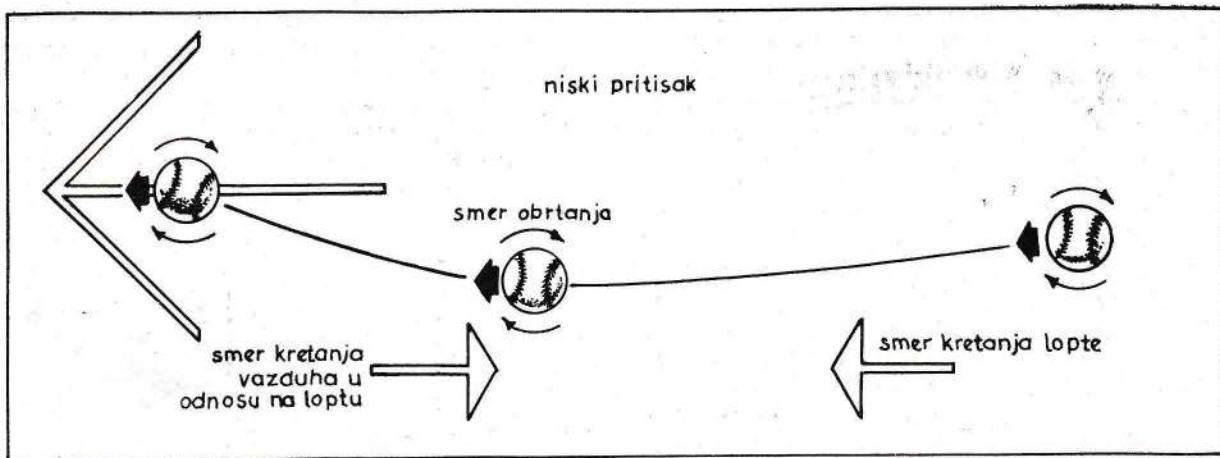
Sl. 13 — Vihori koji nastaju kao posledica strujanja vazduha oko ravne površine postavljene upravno na strujanje

Vihori. Kada se izvesna masa vazduha kreće preko jedne površine, izvestan broj čestica teži uvek da se odbije od te površine ili da se zavrti oko nje, kao što je prikazano na slici 13. Uzburkanost izazvana kovitljanjem ovih čestica poznata je pod imenom vihor. Broj vihara zavisi od raznih čimilaca, kao što su glatkorost, veličina i oblik površine. Njihov broj se menja u zavisnosti od ugla koji ova površina zaklapa sa strujom vazduha i u zavisnosti od relativne brzine i gustine vazduha.

Uzgon i otpor. Zbog trenja izmedu mase vazduha i nagnute površine, kako je to pokazano na slici 14, nastaje sila koja teži da pokrene površinu *paralelno* samoj sebi. Postoji na isti način i jedna sila upravna na dotičnu površinu, prouzrokovana skrenutim vazdušnim strujama. Ove sile daju rezultantu usmerenu unazad u odnosu na pokretnu vazdušnu masu. Razlaganjem ove sile dobija se sila upravna na vazdušno strujanje, nazvana *uzgonom*, i druga sila,



Sl. 14 — Sile koje deluju na ravnu površinu izloženu vazdušnom strujanju



Sl. 15 — Bernulijeva teorema primenjena na loptu koja se obrće

paralelna kretanju vazdušne mase, nazvana *otporom*. Ugao koji zaklapa pokretna vazdušna masa sa površinom zove se *napadni ugao*. Slika prikazuje sile koje sačinjavaju rezultujuću silu — rezultantu na površinu, pri jednom određenom napadnom uglu.

Bernulijeva teorema. Italijanski naučnik Daniel Bernuli otkrio je da ukupna energija u svakom sistemu ostaje uvek nepromenljiva. Drugim rečima, ako se poveća ma koji činilac u nekom sistemu koji raspolaže energijom, drugi se mora smanjiti da bi se održala ravnoteža.

Pre no što se objasni primena Bernulijeve teoreme na aeroprofil, objasniće se šta se dešava sa bačenom loptom. Zavitlana šakom, lopta se zavrći. Na ovaj način, pošto napusti šaku, lopta dobija dve vrste kretanja (to se vidi na slici 15): lopta se obrće oko svoje osovine upravne na tle i, ujedno, kreće se unapred.

Ova dva kretanja lopte izazivaju različite brzine vazduha koji se kreće mimo lopte. Na onoj strani lopte koja se obrće u susret strujanja vazduha, ukupna brzina vazdušnog strujanja smanjuje se pošto se ovim obrtanjem vrši delimično suprotstavljanje brzini kojom se vazduh kreće mimo lopte. Na onoj strani lopte koja se obrće niz struju vazduha, brzina vazduha koji je lopta stavila u obrtanje i brzina vazduha koji protiče kraj lopte imaju isti smer. Zato je brzina vazduha veća na strani koja se obrće u smeru vazdušne struje.

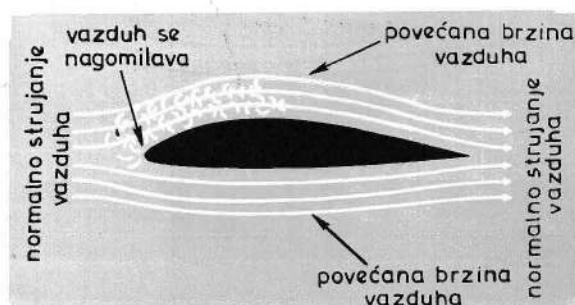
Imajući u vidu postavku Bernulijeve teoreme da ukupna energija u svakom sistemu uvek ostaje nepromenljiva, postaje očigledno da ako se brzina kretanja vazduha preko neke površine poveća, pritisak koji vazduh vrši na tu površinu mora da se smanji, te da na taj

način održi nepromenljivu ukupnu energiju. I obrnuto, smanjena brzina strujanja vazduha preko neke površine mora da izazove povećani pritisak na tu površinu.

Ako se posmatra bačena, zavitlana lopta, vidi se da na nju deluje neuravnotežen pritisak. Na onoj strani lopte koja se udaljava od nailazećeg vazduha pritisak se smanjuje, pošto je brzina povećana, dok se na suprotnoj strani pritisak povećava, pošto su vazdušna strujanja, svojim međusobnim suprotstavljanjem, smanjila ukupnu brzinu.

Nastajanje sile uzgona na bilo kome aeroprofilu razlikuje se od bacanja lopte po zakrivljenoj putanji samo u pogledu primene. Treba primetiti da gornja površina aeroprofila ima veću zakrivljenost od donje.

Razlika u zakrivljenosti gornje i donje površine krila u stvari stvara silu uzgona. Vazduh koji struji preko gornje površine krila mora da stigne do zadnje ivice krila za isto vreme za koje stiže vazduh koji struji ispod krila. Da bi to postigao, vazduh koji prolazi iznad gornje površine treba da se kreće većom brzinom od



Sl. 16 — Strujanje vazduha preko aeroprofila

vazduha koji prolazi ispod krila, zbog većeg rastojanja koje mora da pređe preko gornje površine. Povećana brzina znači srazmerno smanjenje pritiska na površinu. Na ovaj način nastaje razlika u pritiscima između gornje i donje površine krila, koja podiže krilo naviše sa opštavajući mu na taj način uzgon.

Iz ovoga je vidno da se sila uzgona stvara promenom količine kretanja vazdušne mase. U ovom izlaganju o uzgonu će se govoriti ili sa gledišta povećane sile na donjoj površini nekog aeroprofila, ili sa gledišta povećane brzine vazdušnog strujanja preko gornje površine.

Pri tome uvek treba imati na umu da kad god neko telo menja pravac ili brzinu svog kretanja, na njega deluju sile koje nisu u ravnoteži.

Granični sloj. Granični sloj se javlja kao posledica trenja između površine nekog aeroprofila i vazduha u kojem se kreće. Ovo prianjanje vazduha uz aeroprofil, kao što je na primer krilo, predstavlja ozbiljni problem pri konstruisanju aviona. Kako je već pokazano, uzgon zavisi od brzine strujanja vazduha oko aeroprofila. Kada je brzina strujanja manja, i uzgon se smanjuje. Ogledi sa vrlo glatkim površinama uvek pokazuju smanjenje ovih neželjenih poremećaja što ih izazivaju površine.

Zahvaljujući poznavanju ovih osnovnih zakona fizike koji se javljaju pri letu, mogu se uočiti i drugi činioci koji se pojavljuju u aerodinamici.

PROBLEM AERODINAMIČNIH SILA

Izlaganje o problemima aerodinamičnih sila obuhvata velik broj stručnih izraza koji se odnose na letenje i koje je potrebno razumeti. Prema tome, pre no što se pređe na određene probleme, potrebno je objasniti neke od ovih izraza.

OSNOVNA TERMINOLOGIJA IZ OBLASTI LETENJA

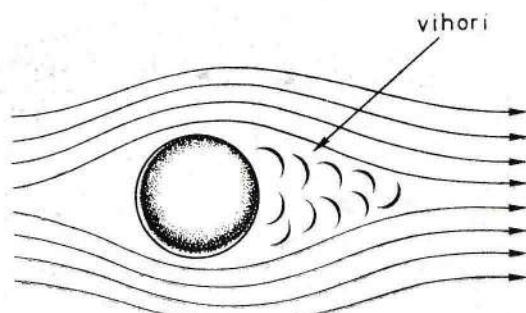
Sledeća objašnjenja nekih stručnih izraza koji se odnose na letenje su samo njihova osnovna značenja. Prema tome, to nisu visokostručna tumačenja.

Aeroprofil. Aeroprofil je bilo koji profilisani deo konstrukcije letelice, oko koga struji vazduh na način koristan po letenju. Najvažniji aeroprofili na letelici su oni koji čine krila. Drugi aeroprofili na letelici sačinjavaju repne površine i trup.

Čelni otpor. Suprotstavljanje nekog predmeta strujanju vazduha oko njega naziva se

čelnim otporom. Čelni otpor potiče od prianjanja vazduha za površinu (granični sloj), a delom od nagomilavanja vazduha ispred tog predmeta. Jedan od osnovnih ciljeva u aerodinamici je da se smanji ovaj otpor, a da se pri tome ipak zadrže veliki uzgon i stabilnost.

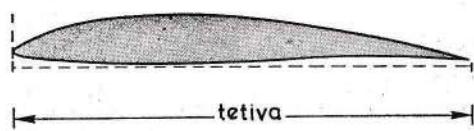
Strujnice. Putanje vazdušnih čestica pri njihovom strujanju oko nekog predmeta zovu se strujnicama. Treba obratiti pažnju na sliku 17.



Sl. 17 — Strujanje strujnica oko loptastog tela

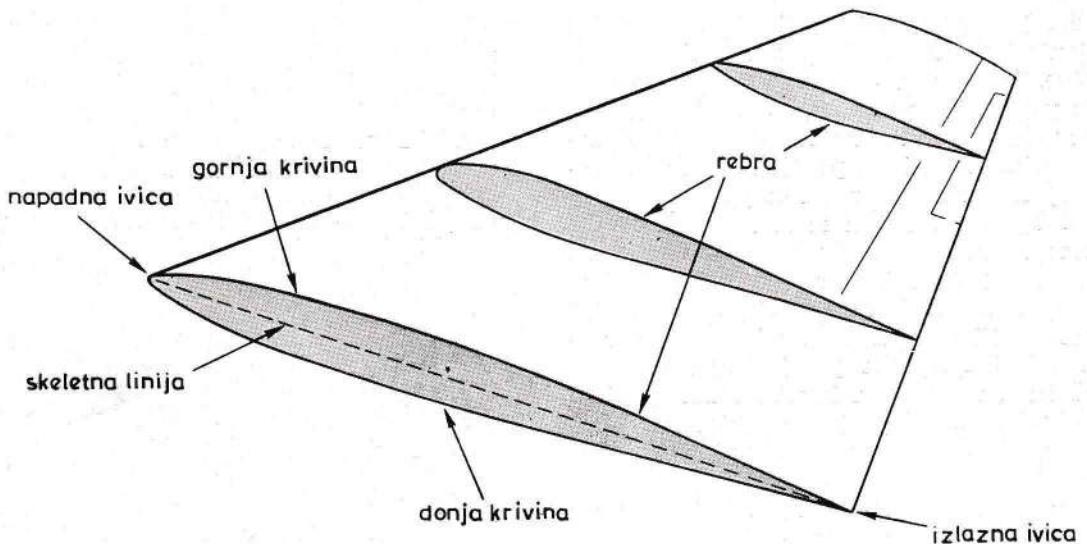
Razmah krila. Razmah krila jeste rastojanje od vrha jednog do vrha drugog krila.

Tetiva. Udaljenje od prednje do zadnje ivice krila zove se tetiva (vidi sliku 18). Tetiva je obično promenljive veličine duž razmaha krila. Zato je obično potrebno govoriti o *srednjoj* tetivi. Srednjom tetivom smatra se odnos između površine krila prema razmahu krila. Na primer, ako krilo ima površinu od 48 kvadratnih metara i razmah od 16 metara, srednja tetiva nalazi se deljenjem površine (48 m^2) sa razmahom (16 m). Srednja tetiva imaće, dakle, 3 metra.

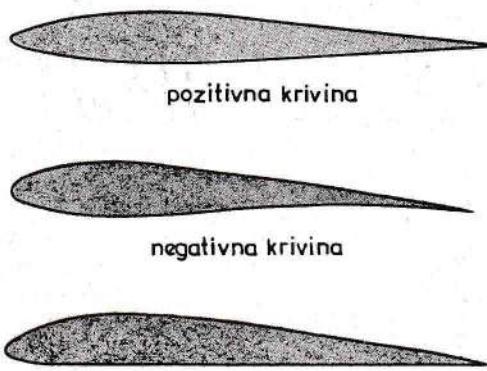


Sl. 18 — Merenje tetive na preseku krila

Krivina profila. Krivina profila obeležava veličinu zakrivljenosti aeroprofila. Krivina profila se obično izražava odnosom veličine odstupanja krive profila od prave linije koja spaja krajeve ove krive i dužine te prave. Gornja krivina profila odnosi se na gornju površinu profila, donja krivina na donju površinu profila, a srednja krivina odnosi se na srednju liniju aeroprofila. Krivina profila je pozitivna kada je odstupanje prema spoljnoj a negativna kada je odstupanje prema unutrašnjoj strani (vidi sliku 19a).



Sl. 19 — Gornja i donja krivina aeroprofila



Sl. 19a — Vrste profila

Stav. Stav određuje položaj letelice u odnosu na tle.

Stabilnost. Stabilnim telom smatra se ono koje se vraća u svoj prvobitni položaj pošto je bilo izvedeno iz ravnoteže uticajem neke spoljne sile. Kada spoljne sile izvedu stabilnu letelicu iz normalnog leta, ona teži da se po mogućству vrati u svoj prvobitni položaj.

Ponekad telo koje je pomereno iz prvobitnog položaja zauzima neki novi položaj, ne vraćajući se u raniji, ali ne nastavlja da se i dalje udaljava od njega. Takvo telo je *neutralno stabilno* ili *indiferentno*. Prema tome, ukoliko se stav neutralno stabilne letelice promeni uticajem neke spoljne sile ili uticajem komandi, letelica ne teži da se vrati u svoj prvobitni položaj, nego ostaje u novom položaju sve dok na nju ne počnu uticati druge sile.

Treća vrsta stabilnosti jeste negativna slabost ili *nestabilnost*. U slučaju nestabilnosti, telo pomereno iz svog prvobitnog položaja stalno teži da se od njega udaljava. Na primer, kad se nestabilna letelica u letu uvede u penjanje, ona nastavlja da se sve više i sve strmije penje, sve dok ne dođe do gubitka brzine, odnosno prevučenog leta.

Ose projektila. Projektil se obrće oko tri ose, kako je to pokazano na slici 20. Pri normalnom horizontalnom letu, normalna kroz težište letelice smatra se osom skretanja (kursa), uzdužna linija kroz središte trupa (tela) zove se osa nagiba, a linija koja prolazi kroz težište i koja je upravna na uzdužnu osu letelice u horizontalnoj ravni naziva se *osa propinjanja*. Kad god dođe do nekog pomeranja projektila oko mape od tih ose, dešava se jedan od sledećih slučajeva:

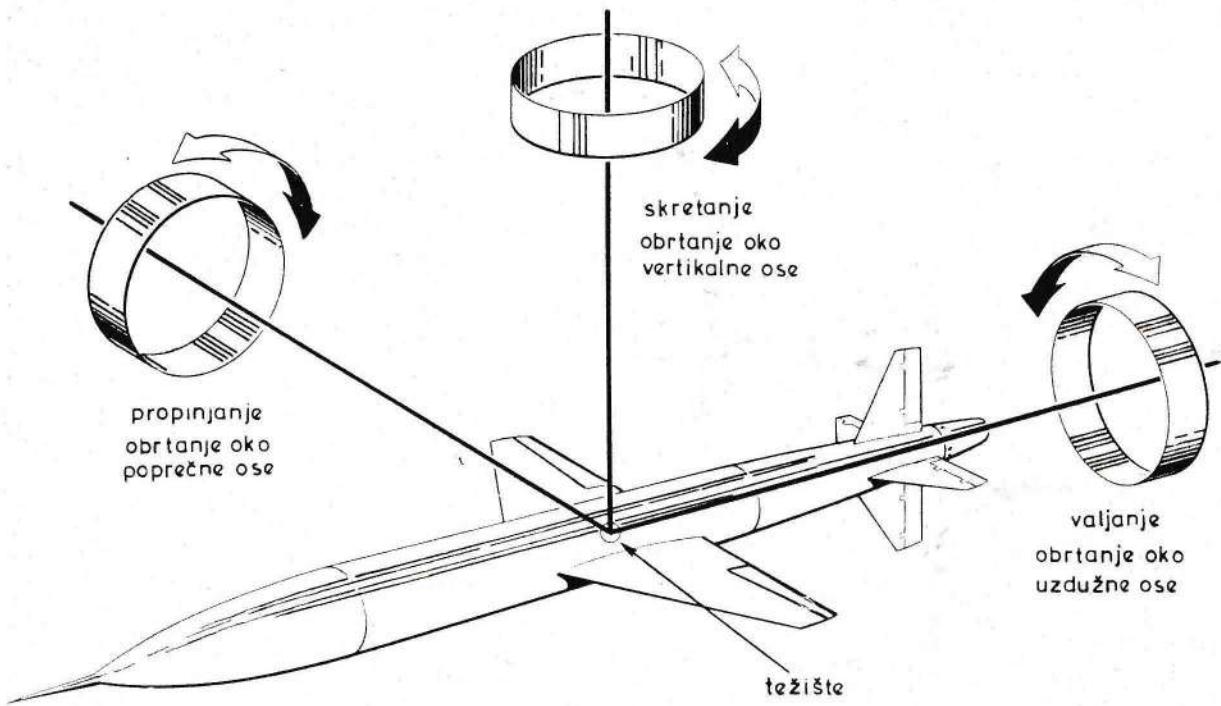
1. Projektil može da osciluje oko ose i potom se vraća u svoj prvobitni položaj (statički stabilan).

2. Projektil postepeno povećava svoje oscilacije i usled toga izađe iz kontrole (statički nestabilan).

3. Može da se vrati u svoj prvobitni položaj bez ikakvih oscilacija.

Ova poslednja mogućnost koja kazuje da je telo stabilno i jeste cilj koji se želi postići. Kasnije će biti pokazano kako se rešava ovaj problem stabilnosti.

Pregib. Ugao pozitivnog pregiba krila zaklapaju referenta linija kroz površinu krila i poprečna osa letelice. Ovaj ugao leži u ravni upravnoj na dužnu osu letelice. *Negativni pre-*



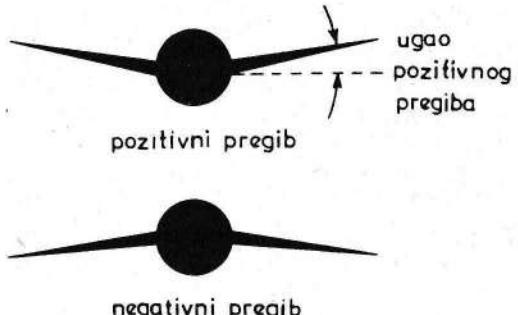
Sl. 20 — Stav projektila u letu

gib je, ugao između krila spuštenog naniže (kada se gleda od trupa prema njegovom vrhu) i poprečne ose letelice. Negativni pregib često se koristi kod letelica konstruisanih za nadzvučne brzine (vidi sliku 21).

PROBLEMI VEZANI ZA VAZDUŠNE SILE

Pošto su upoznati neki aerodinamički termini i postoji opšta predstava o silama i njihovom dejstvu na aeroprofil, može se preći na neke specifičnije probleme aerodinamičkih sila. Pošto je aeroprofil-krilo najvažniji deo nosećih površina letelice, o njemu će biti najviše govora.

Odnos modela projektila prema projektilu u pravoj veličini. Iako model projektila, izrađen u odgovarajućoj razmeri, »leti« u aerotunelu pod gotovo istim uslovima kao projektil u pravoj veličini kroz vazduh, strujanja vazduha vezana za te dve vrste leta nisu ista. Ova razlika postoji zbog toga jer se sila koja potiče od mase vazduha i sile nastale usled trenja ne povezuju istim zakonima. Sila usled mase vazduha pokorava se, naime, *zakonom kvadrata*, dok se sila usled trenja vlasti po *zakonu upravne proporcije*. Sila koja potiče od mase srazmerna je: (dužina) \times (dužina) \times (brzina) \times (brzina), a sile usled trenja upravo su srazmerne: (dužina) \times (brzina).



Sl. 21 — Pozitivni i negativni pregib

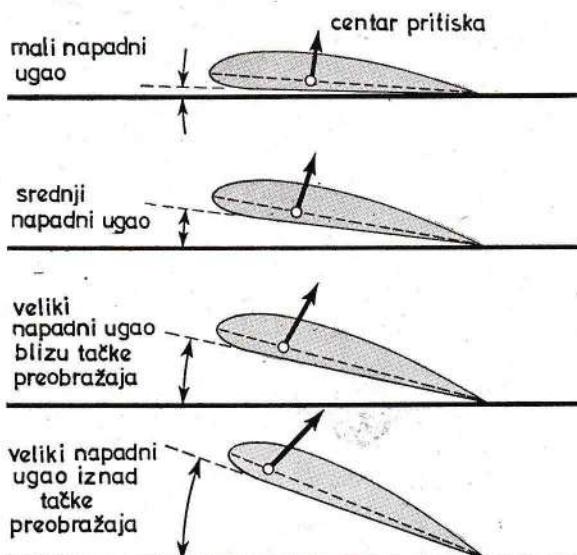
Prava veza jedva da postoji pri ispitivanjima modela, pošto su sile koje deluju na model u opštem slučaju mnogo manje nego sile na projektilu u pravoj veličini. Zbog ovakvih neslaganja između ispitivanja modela u tunelu i leta projektila u pravoj veličini potrebno je graditi opitne letelice u pravoj veličini, da bi opitni letovi dali odgovarajuće podatke. Razlike između uticaja vazdušnih sila na model i na letelicu u pravoj veličini postaju naročito izrazite pri nadzvučnim brzinama.

Centar pritiska. Na svaki delić površine krila deluje izvesna veoma mala sila. Ova sila razlikuje se po veličini i pravcu od sile koja dejstvuje na ma koju drugu površinu ispred ili iza te tačke. Moguće je matematički sabrati sve

obe male sile. Zbir svih malih sila na ovoj površini naziva se rezultantom. Ova rezultanta ima *veličinu, pravac i položaj*. Tačka preseka pravca u kojem dejstvuje ova rezultanta sa tečivom aeroprofilu zove se *centrom pritiska*.

Za vreme pravog leta letelice javljaju se razne brzine vazduha za različite napadne uglove. No ukoliko se, radi ispitivanja, brzina održava nepromenljivom, a napadni ugao se menja, tad su rezultati ovog ispitivanja na nesimetrični aeroprofil prikazani na slici 22. Slika pokazuje aeroprofil pri različitim napadnim uglovima i uticaj raznih napadnih uglova na rezultujuću силу i na položaj centra pritiska.

Tačka preobražaja pokazana na slici 22 je



Sl. 22 — Pomeranje centra pritiska kao posledica različitih napadnih uglova

tačka u kojoj vazdušno strujanje preko gornje površine postaje uzburkano, prouzrokujući nejednaku raspodelu pritiska. Tačka preobražaja se obično dostiže kada se napadni ugao poveća na 18° ili 20° .

Pri malim napadnim uglovima rezultanta pritiska je srazmerno mala. Njen smer upravljen je naviše i unazad u odnosu na normalu, a njena napadna tačka je znatno udaljena od napadne ivice. Treba obratiti pažnju na to da se centar pritiska pomera sa promenom napadnog ugla i da je rezultanta usmerena naviše i unazad. Pri pozitivnom napadnom uglu od 3° ili 4° rezultanta ima skoro vertikalni pravac. Povećanje ili smanjenje napadnog ugla dovodi uvek do skretanja pravca rezultante od vertikale.

Da bi se odredila veličina sile koja deluje na neku površinu, potrebno je pre svega naći

masu vazduha koja utiče na ovu površinu. Brzina vazduha i površina na koju on deluje moraju biti poznate da bi se našla masa vazduha. Tako se masa vazduha nalazi na sledeći način:

Masa = presek \times brzina \times gustina
gde je gustina, na osnovu jednostavne definicije, količina vazduha po jedinici zapremine.

Prepostavimo da masa vazduha koja se kreće u horizontalnom pravcu malo skrene na niže (brzina kojom se kreće masa vazduha izražena je u metrima u sekundi). Uzgon koji stvara ta masa vazduha (izražena u kilogramima) jednak je proizvodu mase i promene u brzini:

Uzgon = poprečni presek \times brzina \times gustina \times brzina skretanja.

Ovo je uprošćeni obrazac za izračunavanje uzgona. To je osnovni obrazac, a kasnije će se videti da postoje i drugi činiovi koje još treba uzeti u obzir pri izračunavanju uzgona.

Kao što je već ranije izneto, rezultujuća sila koja deluje na krilo pod određenim uslovima može se opisati sa dve komponente razložene u dva pravca, pri čemu su izabrani upravni, odnosno paralelni pravci na relativni vjetar. Ove komponente, su bile nazvane uzgon i otpor.

Određivanje uzgona. Sila uzgona zavisi od profila krila, napadnog ugla, gustine vazduha, površine krila i kvadrata brzine vazduha. Opšta jednačina za silu uzgona data je u obliku:

$$R_z = c_z \frac{\rho}{2} S_v^2$$

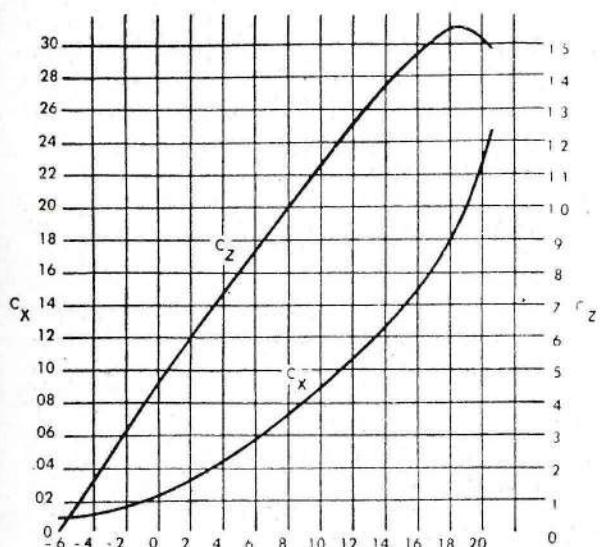
gde je » R_z « — sila uzgona u kilogramima; » c_z « — koeficijent sile uzgona koji zavisi od profila krila i napadnog ugla; » ρ « — gustina vazduha u kilogramima mase po kubnom metru, » S « — površina krila u kvadratnim metrima, a » v « — vazdušna brzina u metrima u sekundi.

Koeficijent uzgona (c_z) i koeficijent otpora (C_x) određeni su pomoću ispitivanja u aerodinamičkom tunelu i dati su u obliku karakterističnih krivih za određeni aeroprofil koji se razmatra. Dijagram na slici 23 pokazuje tipične krive za jedan aeroprofil.

Da bi se postigao horizontalni let, ukupni uzgon mora biti jednak težini koju on održava u vazduhu. Sa povećanjem napadnog ugla raste i koeficijent uzgona. Najveća vrednost koeficijenta uzgona dostiže se u tački na kojoj vazduh ne teče više laminarno preko površine krila, nego teži da se odvoji od nje. Ovo cepanje (tačka preobražaja) se dešava u kritičnom napadnom uglu, odnosno prevučenom letu. Kada se ovaj ugao dostigne, brzo opadaju i sila uzgona i vazdušna brzina.

Minimalna moguća vazdušna brzina dostiže se pri letu sa uglom najvećeg koeficijenta uzgona. Drugi naziv za ovaj ugao najvećeg uzgona je »ugao minimalne brzine«. Kada se poveća težina letelice, uvećava se i opterećenje krila. Prema tome, da bi se letelo sa istim napadnim uglom u slučaju povećanja težine, mora se povećati vazdušna brzina.

Ponekad se smanjuje razmak krila da bi se povećala brzina letelice. Smanjenjem površine krila povećava se opterećenje na njima, pa je stoga potrebna veća brzina za svaki napadni ugao u odnosu na brzinu pre smanjenja površine.



Sl. 23 — Karakteristične krive uzgona (c_x) i otpora (c_z) jednog aeroprofilta

Određivanje čelnog otpora. Čelični otpor je opiranje vazduha u pravcu kretanja tela. Čelični otpor je komponenta rezultujuće sile na krilo i ta komponenta je *paralelna* sa pravcem kretanja. Znači da je to sila koja se suprotstavlja kretanju napred. U horizontalnom letu ovu silu treba savladati potiskom (silom koja pokreće letelicu napred). Sila čelnog otpora (u kilogramima) je proizvod koeficijenta čelnog otpora dobijenog iz karakterističnih krivih za dotični aeroprofil, pomnoženog polovinom gustine vazduha, površinom krila u kvadratnim metrima i kvadratom brzine. Sila čelnog otpora izražena je, prema tome, jednačinom:

$$R_x = c_x \frac{\rho}{2} S_v^2$$

gde je » c_x « — koeficijent čelnog otpora; » ρ « — gustina vazduha; » S « — površina; » v « — brzina.

za male napadne uglove koeficijent čelnog otpora menja se veoma malo sa promenom napadnog ugla. Sa povećanjem napadnog ugla uvećava se i koeficijent čelnog otpora. Koeficijent čelnog otpora je obično vrlo mali u poređenju sa koeficijentom uzgona.

Osim krila na projektilu pružaju takođe otpor kretanju aerodinamičke repne površine i sve druge površine na njemu. Onaj deo čelnog otpora aeroprofila, koji je vezan sa pojmom sile uzgona, zove se »indukovani otpor«. *Otpor onih delova letelice koji ne doprinose uzgonu naziva se »parazitnim otporom«.* Oba, i parazitni i indukovani otpor, menjaju se sa kvadratom brzine. Uloga pogonske sile je da usmerena napred savlada silu čelnog otpora koji deluje unazad.

Sila koja izaziva ubrzanje je »neuravnotežena«. Njoj se ne suprotstavlja neka druga sila iste veličine a suprotnog smera. Takva sila koja deluje na određeno telo izaziva njegovo ubrzanje u smeru sile. Ukoliko se neko telo kreće određenom brzinom, tada je sila potiska koja deluje napred, jednak sili ukupnog čelnog otpora koja deluje unazad, i u tom slučaju nema nikakvog ubrzanja, tj. brzina ostaje uvek ista.

Ako se potisak tako smanji, da je otpor veći od njega, pojavljuje se ubrzanje unazad ili, drugim rečima, usporenje brzine usmerene napred. Smanjenje brzine kretanja napred smanjuje i otpor. Kada se sila otpora smanji toliko da se izjednači sa potiskom, nema više usporenja i telo se kreće novom, smanjenom brzinom.

Otpor krila menja se sa gustom vazduha i kvadratom brzine letelice. U horizontalnom letu projektil leti brže na visini, nego pri istom napadnom uglu na nivou mora. Ovo se dešava jer je gustina vazduha manja na većim visinama, pa se projektil kreće brže zbog smanjenja gustine. Posledica smanjenja gustine vazduha na krilo biva u potpunosti neutralisana sa povećanjem kvadrata brzine. Zato otpor krila date letelice zavisi od napadnog ugla i nezavisan je od visine. Poznat čelični otpor za neku visinu u suštini je isti na svim visinama, pod uslovom da se napadni ugao ne menja.

Da bi se održalo kretanje krila napred kroz vazduh, mora se delovati silom koja je jednak otporu. Ova sila pomnožena sa brzinom jednaka je snazi koja se mora razvijati da bi se održalo kretanje napred. Kada se sila u kilogramima pomnoži sa brzinom u metrima u sekundi, dobija se snaga izražena u kilogram-metrima u sekundi. Po definiciji, jedna konjska snaga iznosi 75 kilogram-metara u sekundi. Snaga »N«

potrebna da pokreće krilo kroz vazduh dobija se iz sledećeg:

$$N = \frac{R_x V}{75} (\text{KS})$$

gde je » R_x « čelični otpor u kilogramima i » v « brzina u metrima u sekundi.

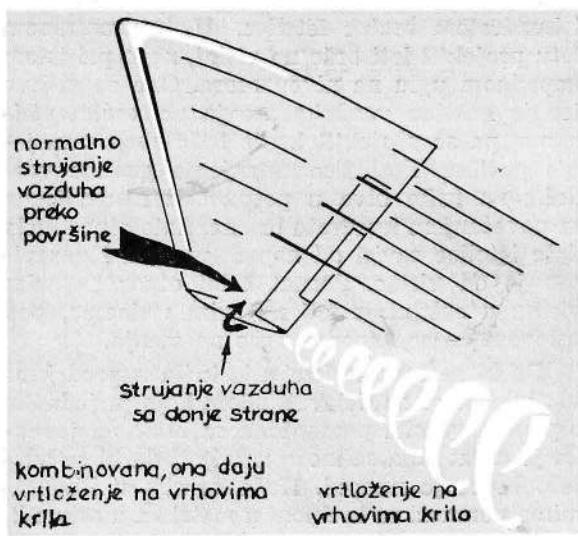
Vitkost. Raspravljujući o silama koje dejstvuju na krilo često je spominjana površina krila. Ona može imati oblik kvadrata ili pravougaonika, sa različitim odnosom dužina njegovih strana. Sile koje deluju na krilo različite su jer zavise od oblika krila, čak i kada veličina površine ostaje ista.

Između raspona i tetive krila može se postaviti određena veza. Ova veza zove se vitkost krila. Kod krila pravougaonog oblika to je odnos između raspona i tetive. Ukoliko, pak, krilo nije jednostavnog pravougaonog oblika, nego mu je vrh *sužen* ili *eliptičan* raspon je još uvek najveće rastojanje od kraja do kraja, ali se tetiva menja u svakoj tački duž raspona. I u tom slučaju može da se nađe srednja tetiva, ali je jednostavnije, za krilo koje nije pravougaono, definisati vitkost kao odnos kvadrata njegovog raspona prema površini. Ovaj odnos izražen obrascem glasi:

$$\text{Vitkost} = \frac{b^2}{S}$$

gde je » b « — raspon krila, a » S « — površina krila.

Kao što je već rečeno, vitkost krila mora biti poznata da bi se u potpunosti mogla odrediti veličina sila koje deluju na njega.



Sl. 24 — Kako nastaje vrtloženje na vrhovima krila

Vrtloženje na krajevima krila. Pri strujanju vazduha oko krila, manji je vazdušni pritisak neposredno iznad gornje površine od vazdušnog pritiska neposredno ispod donje površine. Vazduh pod većim pritiskom ispod krila prelazi preko krajeva prema gornjoj površini, kao što je pokazano na slici 24.

Ovo prelaženje vazduha sa donje površine kombinuje se sa normalnim strujanjem vazduha, izazivajući pri tom vrtložno strujanje na krajevima krila. Ta pojava se naziva *vrtloženje na krajevima krila*. Na svakom kraju krila uticaj vrtloženja usmeren je ka potiskivanju vazduha prema unutrašnjoj strani i naniže. *Strujanje naniže*, izazvano vrtloženjem na krajevima krila, više remeti normalno strujanje oko krila kraćeg raspona, nego oko krila sa većim rasponom. Za dva krila iste površine manje vitko krilo ima srazmerno manji raspon nego vitkije krilo.

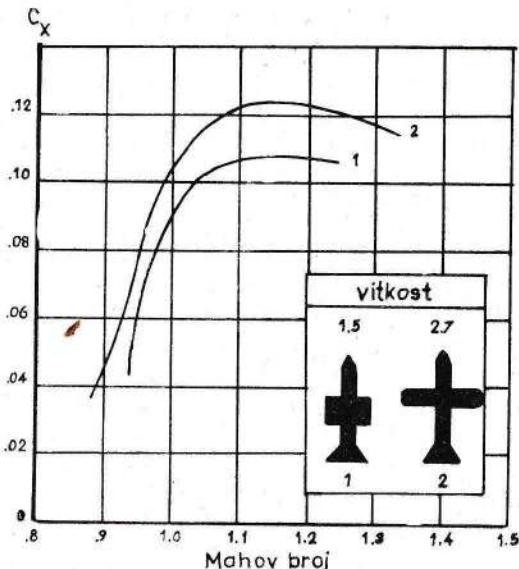
Prilikom ispitivanja uticaja vrtloženja na krajevima krila, govoriće se o čelnom otvoru krila sastavljenom iz dva dela nazvana profilni i indukovani otpor. Profilni otpor je u osnovi površinsko trenje vazduha sa krilom i ne zavisi od napadnog ugla vitkosti. Indukovani otpor vezan je, međutim, za strujanje usled vrtloženja na krajevima krila koje se vrši naniže. Veličina indukovanih otpora zavisi i od vitkosti i napadnog ugla.

Pošto je *ukupni otpor* krila zbir njegovog profilnog i indukovanih otpora i pošto se indukovani otpor menja sa raznim stepenima vitkosti, ukupni otpor menja se isto tako u zavisnosti od vitkosti. Kada je vitkost veća, uticaj vrtloženja na vrhovima krila sastoje se u izazivanju istog koeficijenta uzgona kao kod manjih napadnih uglova. Krajnji rezultat promene vitkosti prikazan je na slici 25. Za jednu datu vitkost, pri svakom napadnom uglu, koeficijent uzgona je veći, a koeficijent otpora manji nego kod krila manje vitkosti.

Slika 25 pokazuje da je teorijski poželjna naj... moguća vitkost, ali da bi konstrukcija bila što čvršća, vitkost krila letelice retko premaša vrednost 8,5.

Upavljanje u odnosu na tri ose. Letelice moraju biti tako konstruisane da lete po kursu bez stalne popravke pravca. Ovakva stabilnost omogućena je primenom uređaja za upravljanje letelicom oko njene tri ose.

Stabilnost u odnosu na vertikalnu osu. Stabilnost u odnosu na vertikalnu osu obezbeđuje se u opštem slučaju pomoću vertikalnog stabilizatora. Kada avion teži da skrene udesno (skretanje udesno), povećava se pritisak na levu



Sl. 25 — Uticaj vitkosti na otpor krila

stranu vertikalnog stabilizatora. Ovaj povećani pritisak opire se obrtanju i primorava rep da se okreće u suprotnom pravcu.

Na običnim avionima vertikalni stabilizator podeljen je i ima pokretni deo nazvan vertikalnim kormilom koje se koristi za upravljanje po pravcu. Osim vertikalnog kormila, mogu postojati i površine za trimovanje (podešavanje) koje se mogu postaviti za određeni pravac leta u odnosu na preovlađujuće vazdušno strujanje. Trimeri kompenzuju vazdušne sile, otklanjajući potrebu za stalnom promenom položaja vertikalnog kormila.

Zajedno sa vertikalnim stabilizatorom i vertikalne strane trupa deluju kao stabilizujuće površine, i to na isti način kao i vertikalni stabilizator.

Stabilnost po pravcu postiže se i streloškim krila. *Strelom* se naziva ugao koji napadna ivica krila zaklapa sa uzdužnom osom projektila (ugao se meri od nosa projektila). Kada projektil skrene udesno, napadna ivica levog strelastog krila postavlja se pod većim uglom prema relativnom vетру, dok desno krilo zauzima položaj pri kojem zaklapa manji ugao u odnosu na relativni vетар. Ovi uslovi izazivaju veći otpor na levom a manji na desnom krili. Otpor teži da se izjednači, primoravajući na taj način projektil da se vrati u svoj prvobitni stav.

Stabilnost u odnosu na uzdužnu osu. Stabilnost projektila u odnosu na uzdužnu osu obezbeđuje se pomoću pozitivnog pregiba i položaja krila.

Pozitivni pregib krila obezbeđuje stabilnost prouzrokujući promenu uzgona na površinama krila. Ako projektil počne da se valja, on će

nešto skliznuti u stranu i time stvoriti komponentu relativnog vетра. Ova komponenta povećava uzgon na nižem a smanjuje uzgon na višem krilu. Uzgon se povećava na nižem krilu, jer napadni ugao krila postaje veći.

Postavljanje krila pri konstruisanju letelice drugi je način da se postigne stabilnost oko uzdužne ose. Letelica raspolaže većom stabilnošću ako su joj krila postavljena iznad težista, nego ako su smeštene ispod težista. Letelice se dele prema tipu krila na četiri grupe: nisko krilo, srednje krilo, visoko krilo i takozvano parabolikrilo.

Stabilnost u odnosu na poprečnu osu. Stabilnost u odnosu na poprečnu osu zove se *stabilnošću po dubini*. Stabilnost po dubini (visini) postiže se uz pomoć horizontalne površine na repu aviona. Ova površina poznata je pod imenom horizontalni stabilizator. Horizontalni stabilizator sastavljen je iz dva dela: nepokretnog dela koji ustvari služi kao stabilizator i pokretnog dela koji služi kao dubinsko kormilo. Stabilnost po dubini postiže se povećanjem sila koje se javljaju na horizontalnim repnim površinama, kada letelica menja svoj napadni ugao. Na primer, kada projektil teži da skrene nos naniže, sila na gornjoj površini horizontalnog stabilizatora će se povećati, pritiskujući rep naniže i vraćajući projektil natrag u njegov prvobitni stav.

Površine za trimovanje po dubini koriste se za popravke pri ma kakvim uticajima koji mogu dovesti do propinjanja, isto tako kao što se slične površine upotrebljavaju kod vertikalnog kormila.

Ostale vrste površina za upravljanje i uređaja za stabilizovanje biće opisani kasnije u ovoj glavi.

AERODINAMIKA NADZVUČNOG LETA

Potrebno je da se poznaju sile koje neprekidno dejstvuju na celo telo letelice. Ovo znanje pomaže da se razumeju novi problemi koji se pojavljuju kod leta nadzvučnim brzinama. Važniji problemi u aerodinamici velikih brzina javljaju se u vezi sa:

- smanjenjem otpora,
- efikasnošću uzgona,
- aerodinamičkim upravljanjem,
- stabilnošću: statičkom, dinamičkom i automatskom,
- aerodinamikom pogona,
- aerodinamičkim opterećenjima,
- atmosferskim uslovima i
- tehnikom proučavanja aerodinamike velikih brzina.

Sve do kraja II svetskog rata, sposobnosti letelica sporo su poboljšavane. Glavni napredak postignut je u razvoju jačih motora i u manjim aerodinamičkim izmenama u odnosu na ranije konstrukcije. Sa pojavom mlažnih pogonskih grupa, mogli su se znatno povećati brzine novih letelica. Stari metodi konstrukcija, koji su ranije zadovoljavali, izmenili su se iz više razloga. Pre svega, strujanje vazduha pri velikim brzinama obavlja se po drukčijim zakonitostima. Brzine bliske brzini zvuka zahtevale su da se uzme u obzir pojava stišljivosti vazduha i posledica Mahovog broja. Zatim, pri ovim brzinama, treba rešavati i problem aerodinamičkog zagrevanja. To je takođe zahtevalo da se unesu izmene u konstruisanju aerotunela, zbog posledica nastalih usled aerodinamičke sličnosti, vrsta aeroprofila, problema stabilnosti i drugih uticaja koji sve do tada nisu imali velikog značaja.

Obrazložićemo neka od ovih pitanja i pokazati kako su ovi problemi rešavani pomoću izmena u konstruisanju. Kao i ranije, potrebno je da se prethodno upozna nova stručna terminologija.

STRUČNI IZRAZI U VEZI SA NADZVUČNIM LETOM

Da bi se bolje razumelo izlaganje o nadzvučnom letu, objasnićemo neke stručne izraze koji su s tim u vezi.

Udarni talas. Sa povećanjem brzine projektila, dolazi se do stanja u koje vazduh nije u stanju da se dovoljno brzo ukloni s puta. Znači da vazduh teži da se nagomila ili sabije ispred projektila. Ovo sabijanje vazduha stvara impulse pritiska koji se mogu kretati brzinom zvuka zbog sabijanja vazduha. Međutim, kada projektil dostigne brzinu zvuka, vazduh ne može više da se razdvaja pred njim. Tada se vazduh naglo cepa, izazivajući pojavu nazvanu udarnim talasom.

U udarnom talasu pritisak vazduha se naglo menja, ozbiljno menjajući sile i raspodelu pritiska na projektil. To zahteva velike promene u trimovanju. Strujanje vazduha preko krila slično je strujanju koje nastaje prilikom prevezenog leta pri malim brzinama. Repna površina može da počne kako da se trese (»baftina«). Raste otpor krila. Pomeranje površina za upravljanje može dovesti do novih udarnih talasa, što čini da komande mogu postati neefikasne pri izvesnim brzinama.

Mahov broj. Pošto brzina zvuka igra značajnu ulogu u određivanju udarnih talasa i karakteristika strujanja vazduha na velikim brzi-

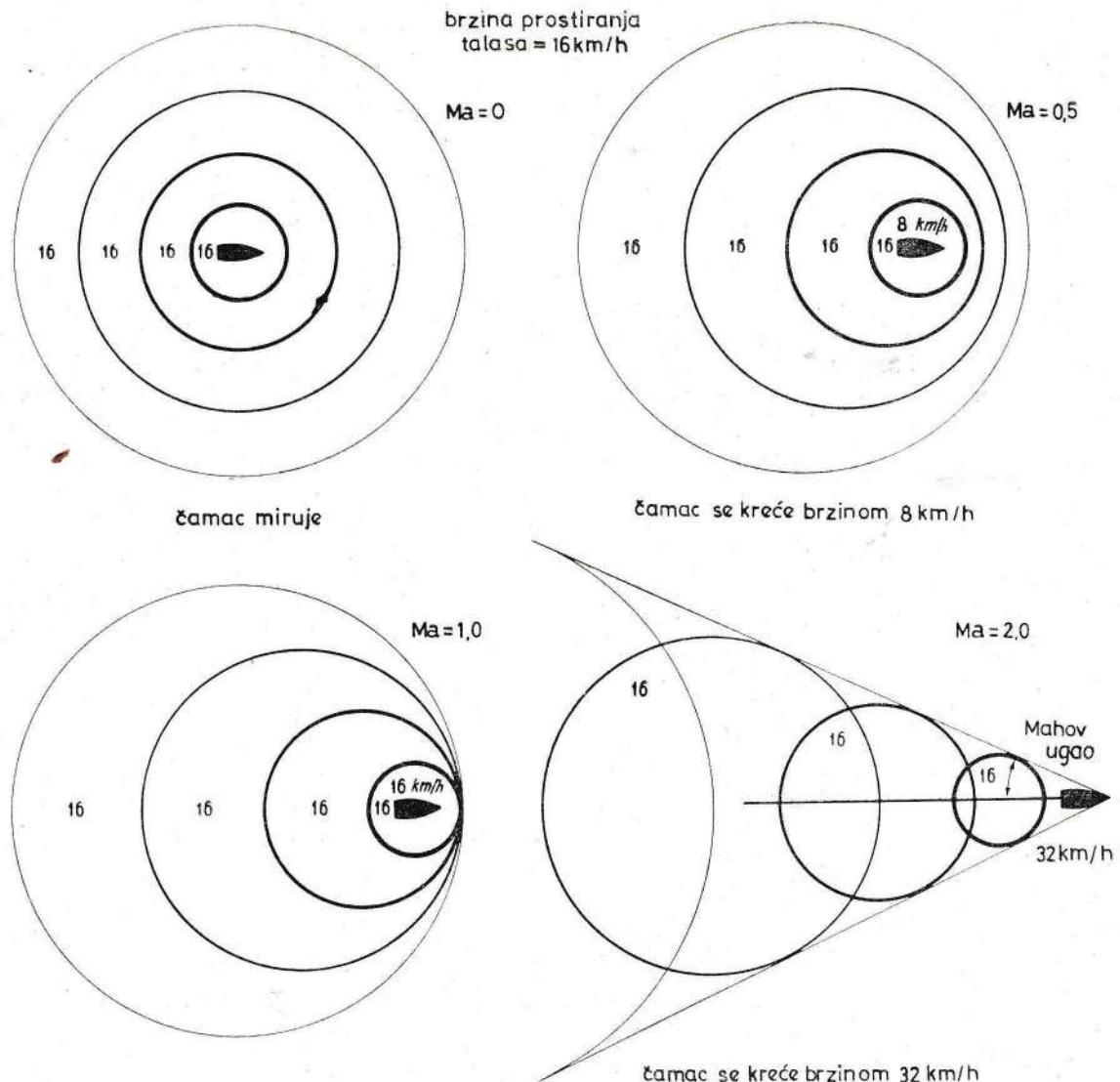
nama, važan je odnos brzine leta prema brzini zvuka. Ovaj količnik zove se Mahovim brojem, prema austrijskom naučniku Ernstu Mahu koji je prvi istakao njegov značaj, i to još 1887. godine. Kada projektil leti brzinom dvaput većom od brzine zvuka, on ima brzinu od 2 maha. Ako se, pak, projektil kreće brzinom upola manjom od brzine zvuka, on raspolaže brzinom od 0,5 maha. Brzina zvuka menja se sa visinom, smanjujući se sa oko 1220 km/h na površini mora na oko 1085 km/h na visini od oko 9160 metara.

Rejnoldsov broj. Kada se radi sa modelima smanjenim u razmeri i letelicama u prirodoj veličini, rezultati ispitivanja ne mogu se porebiti, pa čak ni posle preračunavanja svih poznatih promenljivih uz pomoć nekih koeficijenata. U izvesnim slučajevima promenljive imaju sasvim različiti, ili, čak, suprotan uticaj kada se odnose na smanjeni model. Ova razlika javlja se naročito kada se određuje koeficijent uzgona i otpora.

Koeficijenti uzgona i otpora, naime, kako se menjaju u zavisnosti od odnosa vrednosti veličine modela, relativne brzine vazduha i viskoznosti i gustine vazduha. Ove promenljive izražene su u jednom matematičkom odnosu nazvanom Rejnoldsovim brojem. Samo kada je vrednost odnosa ovih promenljivih ista, tek se onda mogu porebiti ispitivanja modela i stvarne letelice.

Toplotni zid. Prilikom sabijanja vazduha usled efekta nabijanja pri velikim brzinama, nastaje porast temperature. Energija tela u pokretu koja se pretvara u toplotu poznata je kao *toplotni zid*. Porast temperature *upravo* je сразмерan kvadratu nazvučne brzine. Stoga, ako se brzina zvuka udvostruči, temperatura nabijanja se povećava četiri puta. Standardnom temperaturom na morskoj površini računa se 15° Celzijusovih. Ova temperatura smanjuje se sa visinom sve do 14.200 metara, posle čega se uzima da je konstantna. Na morskoj površini temperatura nabijanja je oko 31°C , za brzinu od 1220 km/h, ili za 16° veća od standardne temperaturе na nivou mora. Temperatura nabijanja dostiže oko 127° pri brzini oko 2100 km/h, a približno 530°C pri brzini od 4600 km/h. Za veće brzine leta zahtevaju se zato novi materijali, izdržljivi na visokim temperaturama.

Podela brzina. Dosad su spomenuta dva opšta izraza kada se brzina poređila sa brzinom zvuka: *dozvučna* i *nadzvučna*. Međutim, kategorije brzina mogu se tačnije podeliti na dozvučne, okozvučne, nadzvučne i superzvučne. Brzine nazivamo dozvučnim kada se telo kreće manjom brzinom od one pri kojoj se obrazuje talas sa povećanim pritiskom. To znači, vazduh



Sl. 26 — Analogija Mahovim brojevima i Mahovom uglu

ispred tela dobija neku vrstu upozorenja da se približava telo i može da mu se blagovremeno ukloni s puta.

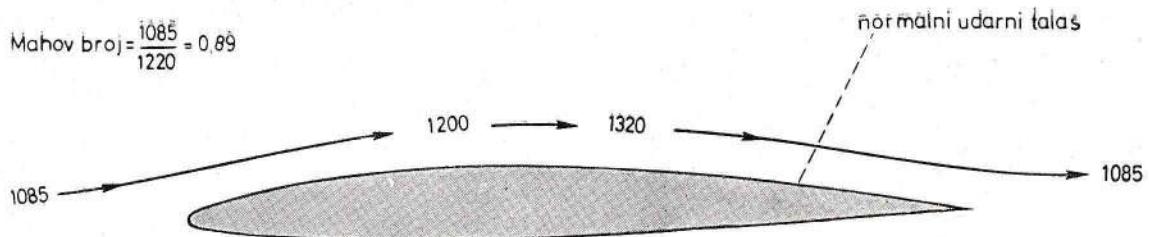
Kada se dostigne tačka u kojoj je brzina tela jednaka brzini talasa sa povećanim pritiskom, talasi se slivanju u jedan jedini impuls veće jačine. Ovaj uslov postoji kada se telo kreće brzinom jednakom brzini zvuka; telo tada ima brzinu približnu zvučnoj brzini. Ove brzine nazivaju se nadzvučne brzine. Kada se telo kreće zvučnom brzinom, postoje tačke u kojima se brzine vazduha oko tela nalaze iznad brzine zvuka, a da ima tačaka u kojima su brzine vazduha ispod brzine zvuka. Znatna uzburkanost i trešenje projektila nastaju upravo u

toj oblasti, pa je poželjno da se brzo prođe kroz oblast okozvučnih brzina, kako bi se izbegli neželjeni poremećaji.

Nadzvučne brzine se javljaju kada vazduh optiče u svim tačkama oko nekog tela brzinom većom od brzine zvuka. Pri nadzvučnom strujanju uzburkanost je mala.

Kao što je pomenuto, četvrta vrsta brzina je daleko nadzvučna ili superzvučna, ponekad nazivana i ultrazvučnim strujanjem. Kada se telo kreće kroz vazduh vrlo velikom brzinom, molekulima vazduha potrebno je kratko vreme da bi se prilagodili prisustvu tela i vratili u prvobitno stanje pošto telo prođe. Ovaj period prilagođavanja i ponovnog vraćanja u prvobitno sta-

$$\text{Mahov broj} = \frac{1085}{1220} = 0,89$$



Sl. 27 — Normalni udarni talas

nje naziva se *vremenom popuštanja*. Ako se telo kreće brzinom većom od vremena popuštanja, ovaj novi opseg brzina zove se *superzvučnim*.

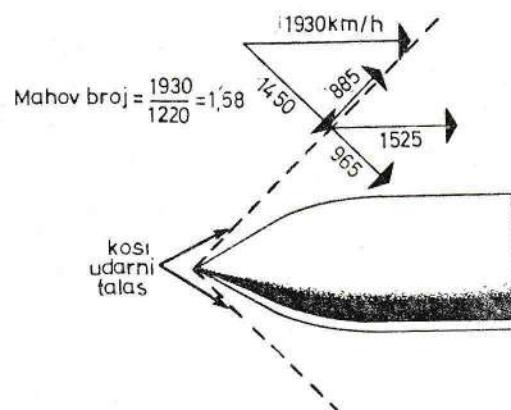
Mahov ugao. Da bi se objasnilo šta se podrazumeva pod Mahovim uglom, treba zamisliti čamac na jezeru. Kada čamac miruje i u julju se na vetr, talasići će se širiti od čamca na sve strane. Brzina kojom se ti talasi kreću naziva se brzinom prostiranja. Pretpostavimo da se ovi talasi kreću brzinom od 16 km/h. Talasi će biti koncentrisani i svaki će ostajati u krugu pretvodnog talasa.

Kada se, međutim, čamac kreće brzinom od, recimo, 8 km/h, talasi će se i dalje širiti brzinom od 16 km/h. Svaki sledeći ostajaće unutar pretvodnog, ali oni neće više biti koncentrični. Odnos između brzine čamca i brzine prostiranja talasa iznosi 5/10. Kada se zamisli da je brzina prostiranja talasa od čamca brzina zvuka, gornji odnos od 5/10 odgovara Mahovom broju 0,5. Kada bi čamac povećao brzinu na 16 km/h, tada bi odnos koji bi odgovarao brzini zvuka bio 1 Mah. Pretpostavimo sada da se brzina čamca poveća na 32 km/h. Ovaj odnos odgovara veličini od 2 maha. Talasi se, naime, još uvek obrazuju brzinom od 16 km/h, ali se centar poremećaja kreće dvaput brže. Slika talasa sada se pretvara u klin na površini vode. U vazduhu gde je strujanje trodimenzionalno, ova slika pretvorila bi se u kupu. Poluugao ovog kline je u stvari *Mahov ugao*. Taj ugao prikazan je na slici 26.

Normalni udarni talas. Ovakav talas prikazan je na slici 27. Aeroprofil ima brzinu (brzinu slobodnog strujanja) 1085 km/h. Crtež pokazuje da je brzina zvuka 1220 km/h. Količnik 1085/1220 daje Mahov broj 0,89. Pošto vazduh ima veću brzinu iznad aeroprofila, ona raste do 1200 a zatim i do 1320 km/h, što je već nadzvučna brzina. Vazduh zatim usporava i vraća se na prvočitnu brzinu od 1085 km/h. Setimo se da Bernulijeva teorema kaže da kada se brzina vazduha menja, menja se i njegov pritisak. Pošto se brzina promenila vrlo naglo (od 1320 do 1085 km/čas), može se očekivati da će postojati vrlo velike razlike u pritiscima. Granični sloj

između dve oblasti sa različitim pritiskom predstavlja mesto u kojem nastaje normalni udarni talas. Normalni udarni talasi upijaju veliku količinu energije koja se pri tom odaje u vidu zračenja.

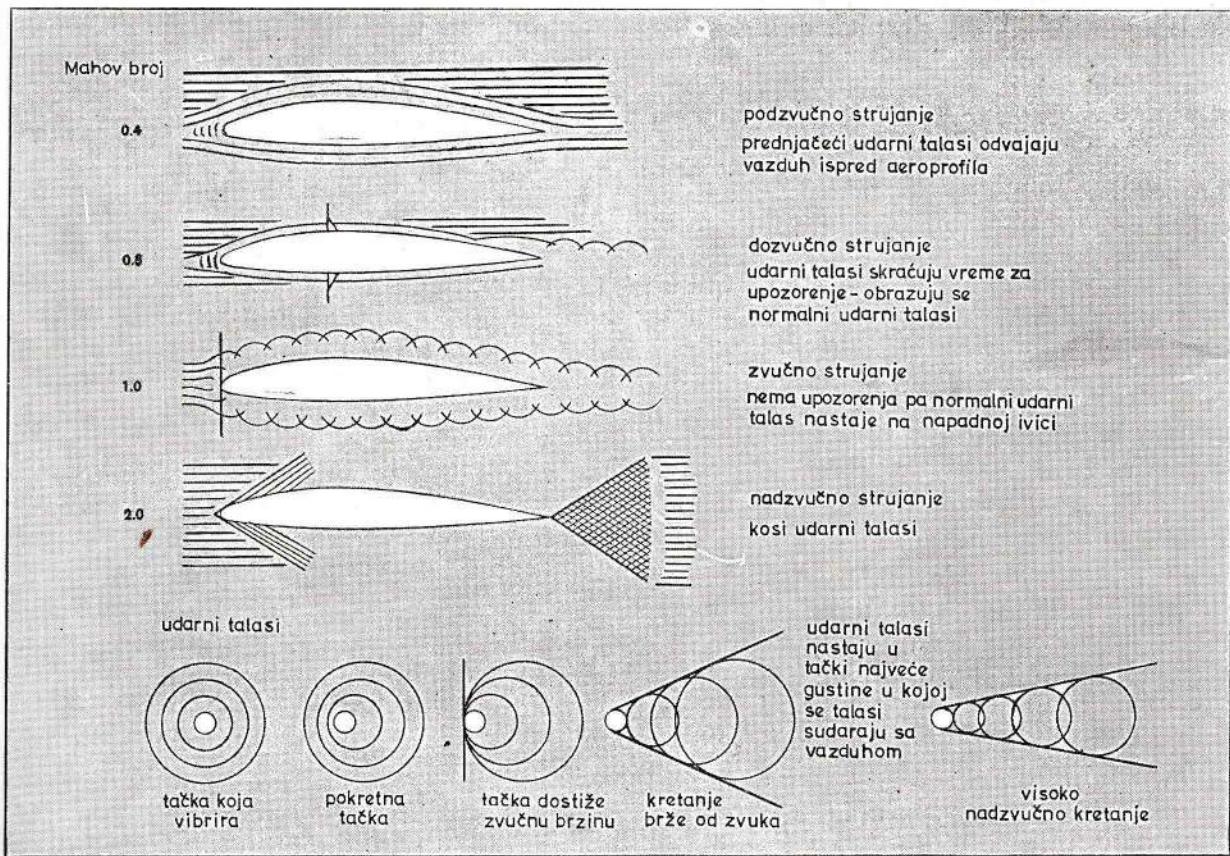
Kosi udarni talas. Pri nadzvučnom letu nastaje još jedna vrsta talasa — kosi udarni talas. Njegovo ime potiče otuda što se on sudara sa slobodnim strujanjem pod kosim uglom. Kosi udarni talas mora da prelazi od nadzvučne na dozvučnu brzinu, upravo kao i normalni udarni talas. Ako pretpostavimo da su vrednosti ovih brzina 1450 i 965 km/h, brzina slobodnog stru-



Sl. 28 — Kosi udarni talas

janja može biti 1930 km/h, a komponenta paralelna sa udarnim talasom može da bude 885 km/čas. Rezultirajuća brzina (recimo 1525 km/h) iza talasa jednak je vektoru koji rezultira od komponenata 1930 i 885 km/h. Rezultirajuća brzina uvek ima pravac paralelan sa površinom tela i ona može da bude ili da ne bude nadzvučna. Prvobitna brzina slobodnog strujanja i kos ugao udarnog talasa su dva činioča koji određuju krajnju brzinu.

Pošto su upoznata značenja nekoliko stručnih pojmoveva koji se odnose na let velikim brzinama, mogu se upoznati pitanja nadzvučnog letenja.



Sl. 29 — Uticaji brzine na vazduh

OBLIK VOĐENOG PROJEKTILA

Oblik projektila je osnovna briga konstruktora pošto upravo oblik projektila uglavnom određuje veličinu otpora i uzgona koji deluju na njega. A ove dve sile, opet, određuju stepen ukupne efikasnosti projektila.

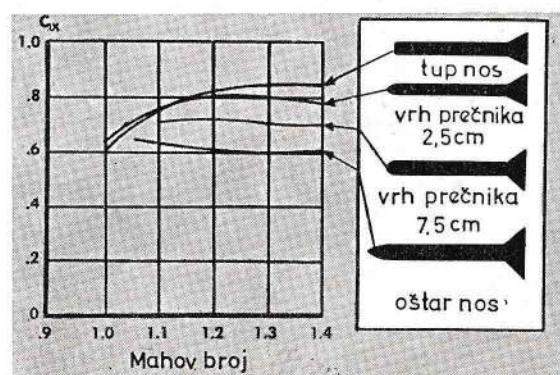
Smanjenje otpora. Postizanje što manjeg otpora u nadzvučnom letu je od velikog značaja. Kod oblika koji pružaju mali otpor mogu se koristiti i manji raketni motori što uslovljava i manji utrošak goriva.

Otpor projektila sastavljen je od otpora trupa, otpora krila i otpora nastalog međusobnim uticajem različitih otpora. Efekat raspodele debljine, Rejboldsov broj, površinski nedostaci i Mahov broj — sve to utiče na otpor. Na otpor krila takođe znatno utiču odnos debljine, strela, vitkost i sam aeroprofil.

Suprotno iskustvu sa dozvučnim letom, ukupan otpor nadzvučnog projektila ne mora neizostavno da predstavlja zbir posebno merenih otpora njegovih delova. Na primer, izgleda da je otpor krila zavisan od oblika trupa na koji je postavljeno.

Na dijagramu na slici 30 prikazan je efekat međusobnog uticaja brzina pri nadzvučnom strujanju vazduha. Krive su dobijene na osnovu ispitivanja modela na raketni pogon u slobodnom letu.

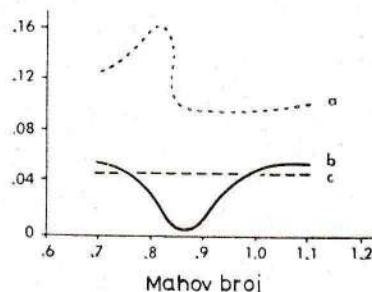
Na najvišoj krivoj pokazan je otpor tela sa tupim nosem. Dodavanjem koničnog vrha koji ima izvestan otpor, znatno se smanjuje otpor međusobne veze koničnog vrha i tela. Osim



Sl. 30 — Uticaji koničnih vrhova na otpor tela

smanjenja efekta međusobnog uticaja, vrhovi ove vrste mogu biti korisni u slučajevima gde se mora naći kompromis u pogledu najpovoljnijih aerodinamičkih oblika, na primer kada neki uređaj za pretraživanje vidokruga unapred zahteva poluloptast nos, da bi se izbeglo deformisanje signala.

Efikasnost uzgona. Za manevriranje potrebno je imati neku uzgonsku silu. Kod projektila velikog dometa, uzgon treba da obezbedi zahtevano održavanje u vazduhu pri najmanjem mogućem otporu. Uzgon mora, na isti način, da se menja bez naglih skokova sa napadnim ugлом, ako se želi zadovoljavajući odgovor na komande. Ponašanje uzgona za tri različita oblika krila pokazano je na sl. 31.



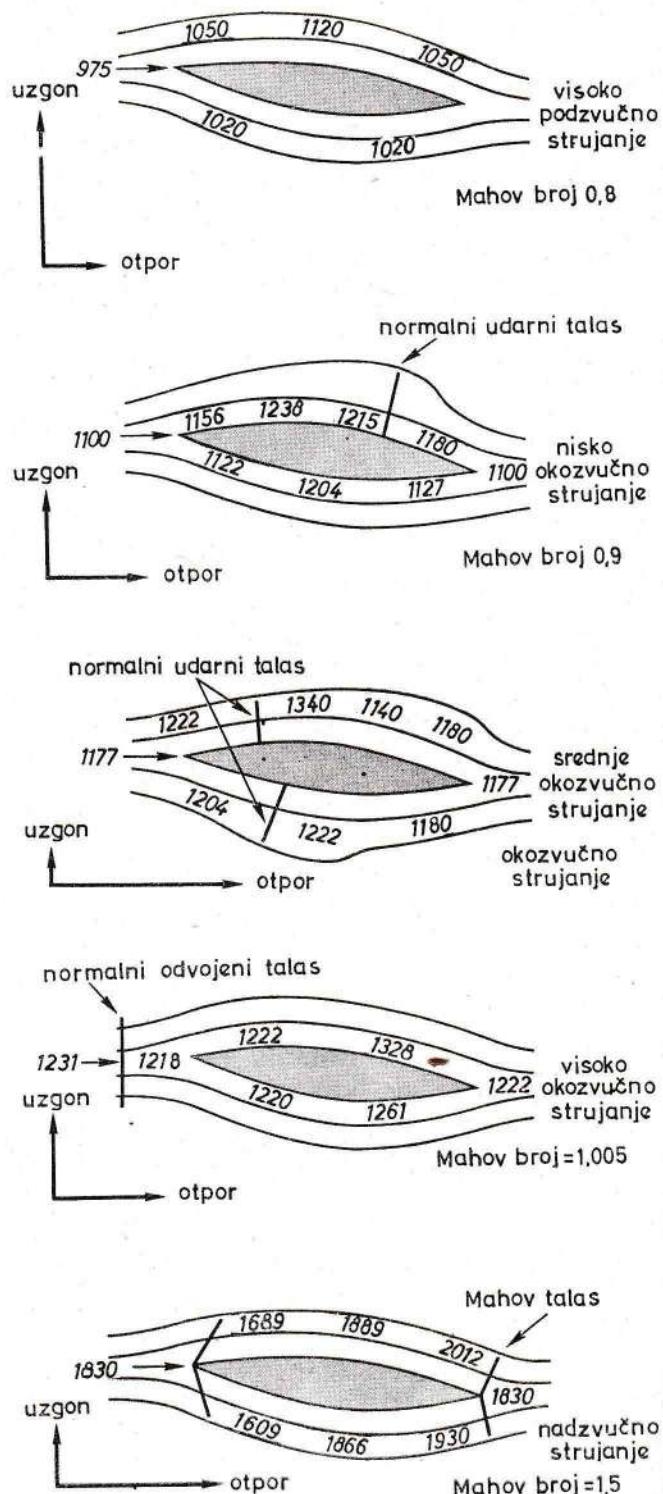
Sl. 31 — Efikasnost uzgona

Najviša kriva (a) prikazuje ponašanje krila velike vitkosti, debljine 10%, bez strele. U tom slučaju dolazi do naglog smanjenja efikasnosti i uzgona — nešto iznad 0,8 maha. Međutim, kroz oblast zvučnih brzina zadržava se određena pozitivna efikasnost sve do nadzvučnih brzina. Druga kriva (b) pokazuje tipično ponašanje relativno debelog krila pri velikim brzinama. U tom slučaju potpuno se gubi efikasnost uzgona pri visokim dozvučnim Mahovim brojevima. Treća kriva (c) daje efekat strele koji odlaže i smanjuje kritične promene nastale u okozvučnoj oblasti. Krilo sa strehom unazad (c) ima isti aeroprofil kao krilo velike vitkosti (a). Kod krila sa strehom unazad postoji vrlo mala promena u ponašanju uzgona iznad oblasti brzina koje su ispitivane.

Strujanje vazduha pri raznim brzinama. Uslovi leta povezani sa dozvučnim strujanjem dobro su poznati. Nadzvučni uslovi izgleda da imaju tako isto pravilan tok i, prema tome, takve su prirode da se lako mogu matematički analizirati. Ali, u okozvučnom opsegu brzina, javljaju se ozbiljni problemi prilikom konstruisanja.

Crteži na slici 32 pokazuju sliku vazdušnog strujanja, zajedno sa promenama u uzgonu i ot-

poru, pri kretanju aeroprofila ograničenog kružnim lukovima od dozvučne do nadzvučne brzine.



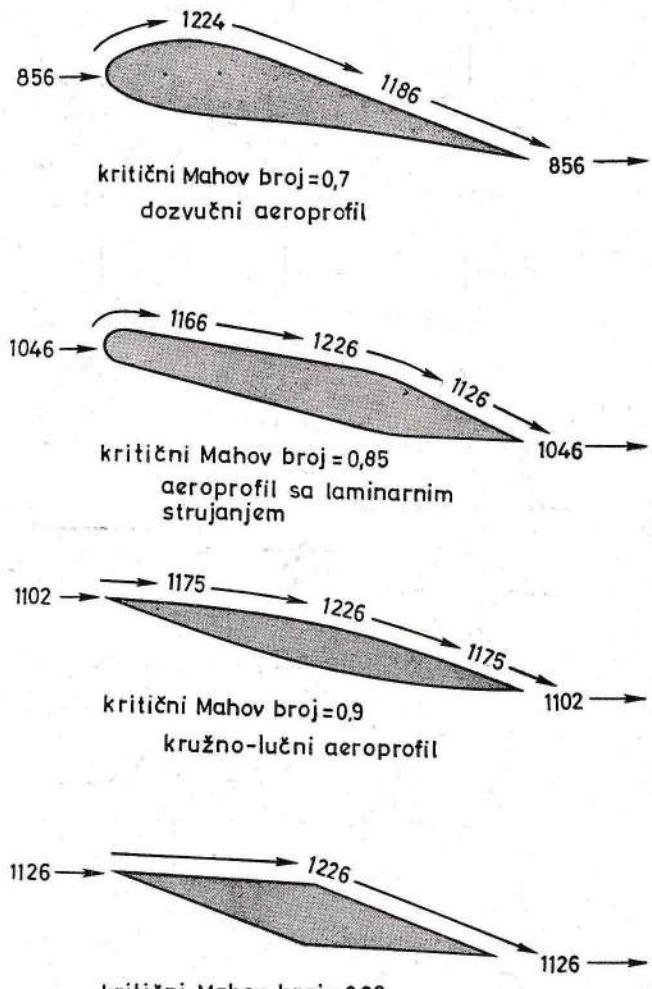
Sl. 32 — Slika strujanja vazduha sa različitim brzinama

Na prvoj slici prikazan je aeroprofil u dozvučnom kretanju. Mahov broj slobodnog strujanja je pri tome 0,8. Ovaj uslov je dobro poznat i na ovaj slučaj se svakodnevno nailazi. Uzgon je mnogo veći od otpora. Druga slika pokazuje uslove na početku okozvučnog strujanja. Mahov broj slobodnog strujanja porastao je na 0,9 i na gornjoj površini nastao je normalan udarni talas. Uzgon se smanjio a otpor povećao. Treća slika predstavlja srednje okozvučno strujanje. Mahov broj slobodnog strujanja porastao je sada već na 0,95 i normalan udarni talas se obrazovao kako na gornjoj, tako i na donjoj površini. Uzgon se još više smanjio a otpor veoma povećao.

Četvrta slika prikazuje visoko okozvučno strujanje. Mahov broj slobodnog strujanja je nešto iznad 1,0. Slabi normalni udarni talas upravo je počeo da se obrazuje na nekoliko satimetara ispred napadne ivice. Normalni udarni talasi na zadnjem delu gornje i donje površine su potpuno nestali, pošto se sada strujanje obavlja zvučnom brzinom preko ovog dela projektila. Uzgon je otprilike isti a otpor se nešto smanjio. Slika na dnu prikazuje potpuno razvijene uslove nadzvučnog strujanja. Mahov broj slobodnog strujanja sada je 1,5. Normalan udarni talas pomerio se unazad i postao Mahov talas, a obični Mahov talas nastao je na izlaznoj ivici. Sada su uslovi vazdušnog strujanja sasvim stabilni. Uzgon je jednak težini projektila. Otpor je veliki, ali to je prouzrokovano velikom brzinom a ne gubicima u energiji udarnih talasa, kao u okozvučnom strujanju.

Iako je do danas mnogo postignuto u odnosu na ukupnu sliku efikasnosti uzgona, ostaje još uvek mnogo da se nauči.

Konstruisanje krila. Strujanje vazduha preko idealnog krila bilo bi dozvučno sve dok se ne dostigne brzina od 1 Maha i tada bi ono odmah postalo nadzvučno. Drugim rečima, okozvučna oblast bila bi eliminisana. U stvarnosti, *okozvučna oblast* počinje čim strujanje preko nekog dela krila postane nadzvučno. Mahov broj slobodnog strujanja na kojem počinje okozvučno strujanje zove se kritičnim Mahovim brojem za to krilo. Crteži na slici 33 prikazuju razvoj aeroprofila za velike brzine. Na prvom dat je tipičan aeroprofil za niske dozvučne brzine, sa kritičnim Mahovim brojem 0,7 na morskoj površini. Zvučna brzina javlja se prvo bliže napadne ivice. Kada se obrazuje normalan udarni talas, on utiče na smanjenje uzgona na najvećem delu gornje površine. Napadna tačka uzgona pomeria se unapred i otpor se brzo povećava.



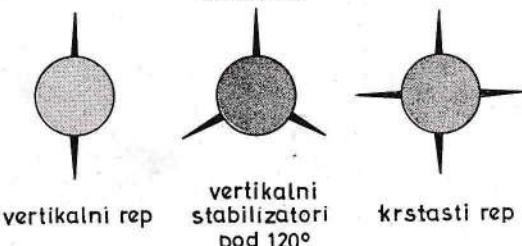
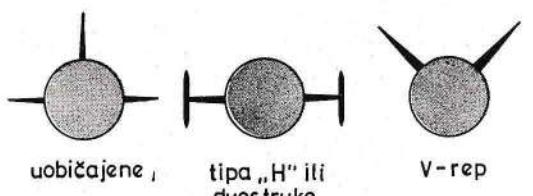
Sl. 33 — Razvoj aeroprofila za velike brzine

Sljedeća slika predstavlja tipičan aeroprofil za visoke dozvučne brzine, sa kritičnim Mahovim brojem 0,85. Vazdušno strujanje dostiže svoju najveću brzinu tek u tački koja je pomerena daleko unazad na krilu. Kada se obrazuje normalan udarni talas, gubitak u uzgonu i povećanje otpora znatno su manji nego kod prvog aeroprofila.

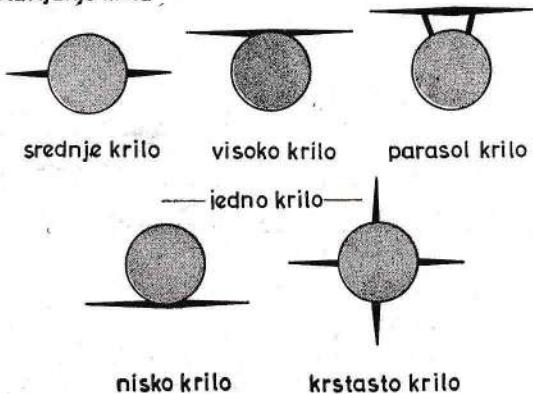
Treći tip pripada vrsti namenjenoj niskim nadzvučnim brzinama. Kritični Mahov broj može da bude i 0,9. To je aeroprofil poznat kao kružno-lučni. Ubrzavanje vazduha preko površine je postepeno. Zbog svog simetričnog oblika, centar pritiska aeroprofila malo se menja kada uzgon opadne. Ova odlika znatno uprošćuje problem upravljanja.

Četvrta vrsta poznata je kao aeroprofil sa klinom. To je takođe aeroprofil za nadzvučne

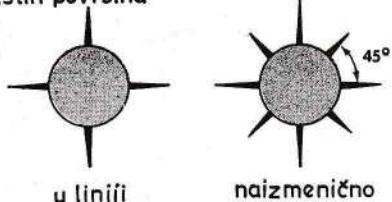
repne površine



postavljanje krila



vezu krstastih površina

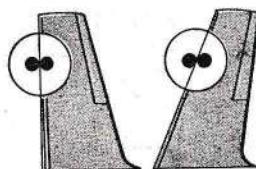


Sl. 34 — Opšte vrste postavljanja aeroprofila

brzine koji ima kritičan Mahov broj 0,9 ili veći. Može se matematički pokazati da je idealan nadzvučni aeroprofil ravna ploča. Međutim, ovakav aeroprofil ne bi raspolagao dovoljnom otpornošću, tj. ne bi mogao da podnese potrebna opterećenja. Ovaj klinasti aeroprofil je, u stvari, izmenjena ravna ploča konstruisana tako, da pruža veću čvrstoću nego ravna ploča.

Osobine klinastog i kružno-lučnog aeroprofila na dozvučnim brzinama su slabe. Ova četiri tipična aeroprofili dovoljna su da stvore ideju o smernicama u konstruisanju da su poželjni tanki i simetrični aeroprofili.

krilo sa streloškim unazad

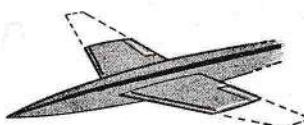


molekuli vazduha prelaze preko krila sa streloškim unazad sporije, odlatažući pojavu stišljivosti

tanji aeroprofil

deli vazdušno strujanje
postepenije nego normalni aeroprofil

skraćeno krilo



velika brzina daje potrebbni uzgon

iglasti vrh



pruža
prethodno upozorenje, pomaže u
odvajaju vazduha

pregib naniže



koristi se sa streloškim unazad radi
boljeg upravljanja

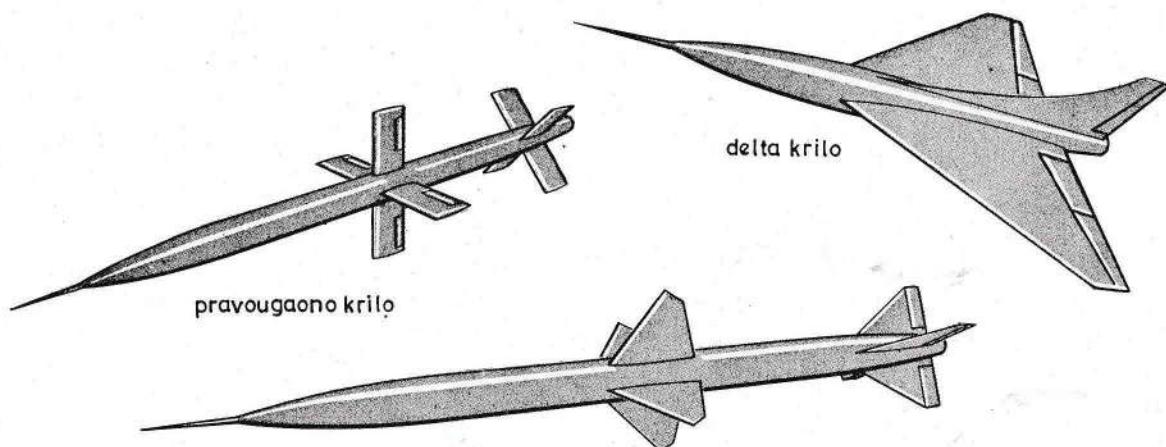
Sl. 35 — Odlike oblika namenjenih velikim
brzinama

Postavljanje aeroprofila. Aeroprofil se postavlja na projektil na osnovu mnogih faktora, kao što su brzina, domet, trajanje vremena lansiranja, zatim na osnovu toga da li se želi ili ne spasavanje projektila. Pri tome se mogu koristiti različite kombinacije tipova prikazanih na slici 34. Slika daje samo najuobičajenije tipove postavljanja.

Repne površine. Repne površine se koriste kod nekih konstrukcija i na nosu, a ponekad se krila koriste kao repne površine. Slika 35 pokazuje neke od tipičnih oblika koji se mogu koristiti u vezi sa navedenim načinima konstruisanja da bi se po-

stigle dobre osobine u letu pri velikim brzinama. (Vidi takođe oblike aerodinamičkih površina na slici 36).

potrebnu promenu pravca. U isto vreme, ono mora raspolagati oblicima konstrukcije koji su najpovoljniji za željenu brzinu. Moraju se, na-



Sl. 36 — Oblici aerodinamičkih nosećih površina

Aerodinamička opterećenja. Jedan od problema konstruisanja projektila je podešavanje aerodinamičnih opterećenja. Ovakvo opterećenje nastaje iz promene pravilnog vazdušnog strujanja. Aerodinamička opterećenja uravnotežuju se u opštem slučaju pomeranjem kormila, postavljanjem strele unazad i oblikom trupa. Pomoći uređaji — antene, uređaji za merenje brzine i razni uređaji za telemetrisanje — čine aerodinamičko opterećenje još većim. Sve ove prepreke pravilnom strujanju uklanjuju se uvođenjem novih sredstava koja mogu da posluže toj svrsi.

U okozvučnoj oblasti potrebno je raspolagati sa još više podataka da bi se u potpunosti odredili i opšte ponašanje uzgona i otpora projektila, i osnovni zakoni koji pri tome vladaju. Sistematska ispitivanja su još uvek potrebna u nadzvučnoj oblasti, da bi se u celosti odredili opšti efekti raznih aeroprofila, međusobnog uticaja vazdušnog strujanja i međusobni uticaj kombinovanih površina. No, konstruisanje projektila namenjenih nadzvučnom letu toliko je već napredovalo, da se na tom polju mogu očekivati stalna poboljšanja.

AERODINAMIČKO UPRAVLJANJE

Aerodinamičko upravljanje je veza koja spašava sistem za vođenje sa putanjom projektila. Pri ovom se mnogo pažnje obraća na gladak i tačan rad komandnih površina projektila. Upravljanje mora da bude dovoljno snažno da proizvede

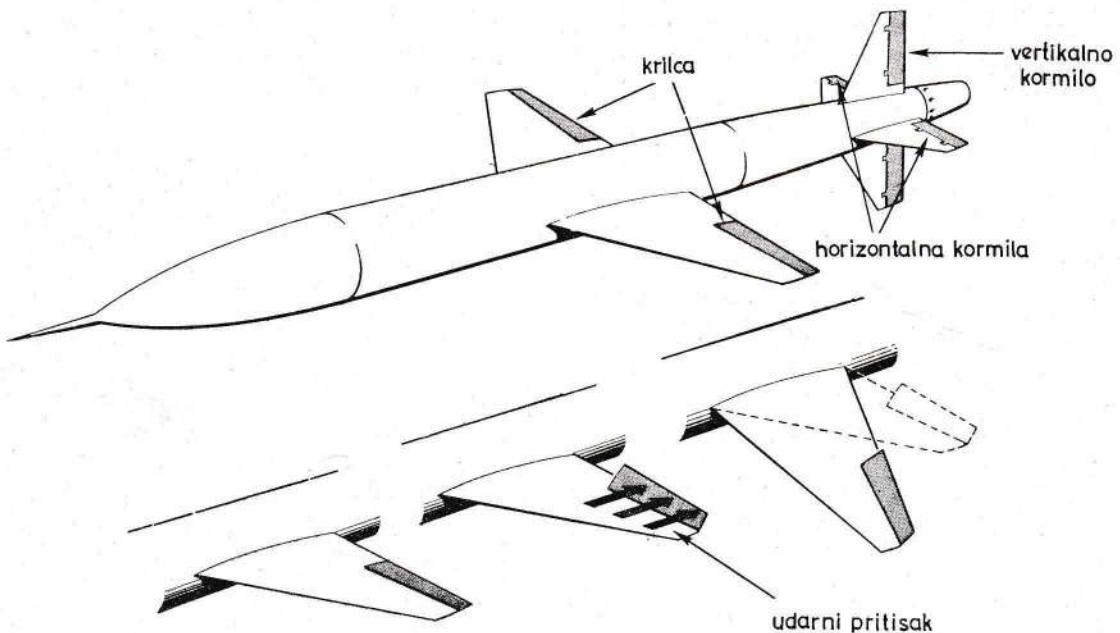
ime, pronaći metode da se uravnoteže komande i promeni položaj kormila, kako bi se suprotstavljalo promenama uzgona i otpora na različitim Mahovim brojevima. Mehanizam za pokretanje, ili servosistem, mora biti takav da uvek efikasno predupredi nestabilnost projektila.

Spoljne komandne površine. Nepokretni stabilizatori su najjednostavnija vrsta komandnih uređaja za stabilnost. Let obične strele predstavlja primer ove vrste stabilnosti, pošto pernati završetak strele obezbeđuje stabilnu liniju leta. Ovaj isti princip održavanja stabilnosti koristi se i u konstruisanju projektila. Nepokretni stabilizatori koriste se, naime, na ovaj ili onaj način, u svim projektilima. Kada se o njima govori, onda se pominju kao stabilizatori specifične vrste: horizontalni stabilizator ili vertikalni stabilizator.

Osim nepokretnih komandnih površina, postoje i pokretne komandne površine nazvane krilcima ili pokretnim kormilima.

Treba imati u vidu da komandna površina nije efikasna sve dok strujanje vazduha preko nje ne dostigne dovoljnu brzinu za razvijanje izvesne sile. Sa povećanjem brzine, reakcija na komandne površine postaje sve jača i često ima za posledicu preterane komandne impuse.

Nedostatak korišćenja nepokretnih stabilizatora, tj. stabilizatora bez ikakvih pokretnih kormila, leži u nemogućnosti da se da tačna komanda za održavanje datog kursa. Da bi se projektilom tačno upravljalo, koriste se dve vrste komandnih površina. To su primarna i sekun-



Sl. 37 — Primarne komandne površine

darna kormila. Primarno kormilo se smatra glavnim faktorom upravljanja sa projektilom na putanji. Ova grupa kormila može, pod izvesnim uslovima i sama dati zadovoljavajuće rezultate. To znači, ukoliko ne bi nastajali uslovi koji dovode do poremećaja stabilnosti, primarna kormila mogla bi da obavlja svoj zadatak bez ikakve pomoći. Međutim, upotrebo sekundarnih kormila u raznim kombinacijama, o čemu će kasnije biti govora, može se mnogo tačnije i efikasnije upravljati projektilom.

Primarna kormila. Krilca, kao i horizontalna i vertikalna kormila, smatraju se primarnim kormilom. Konvencionalna krilca vezana su za spoljnju izlaznu ivicu krila ili glavnih uzgonskih površina. Ovakvo klasično postavljanje prikazano je na slici 37. Kada se jedno krilce spušta, drugo se podiže, upravljujući na taj način valjanjem. Krilca su vezana za glavne uređaje za upravljanje. O raznim drugim sistemima za upravljanje govorice se u kasnijim poglavljima.

Horizontalna kormila vezana su za horizontalni stabilizator na repu. Ona se koriste za upravljanje prilikom propinjanja i zajedno se podižu ili spuštaju.

Najzad, *vertikalno kormilo* koristi se za održavanje pravca. Ono je vezano za vertikalni stabilizator i obezbeđuje upravljanje prilikom skretanja.

Slika 38 pokazuje da vertikalno kormilo, krilca i horizontalna kormila upravljaju kretan-

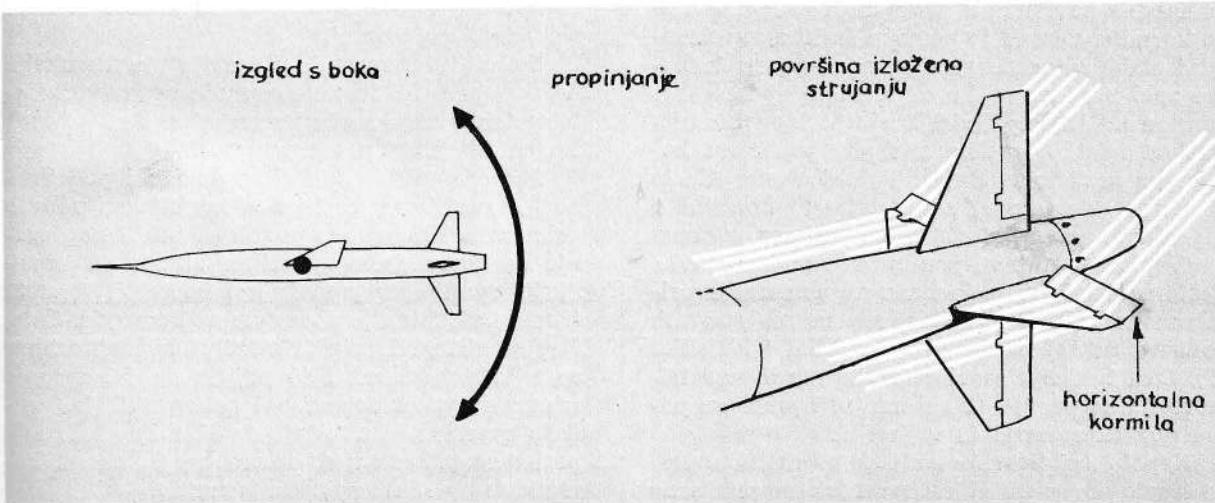
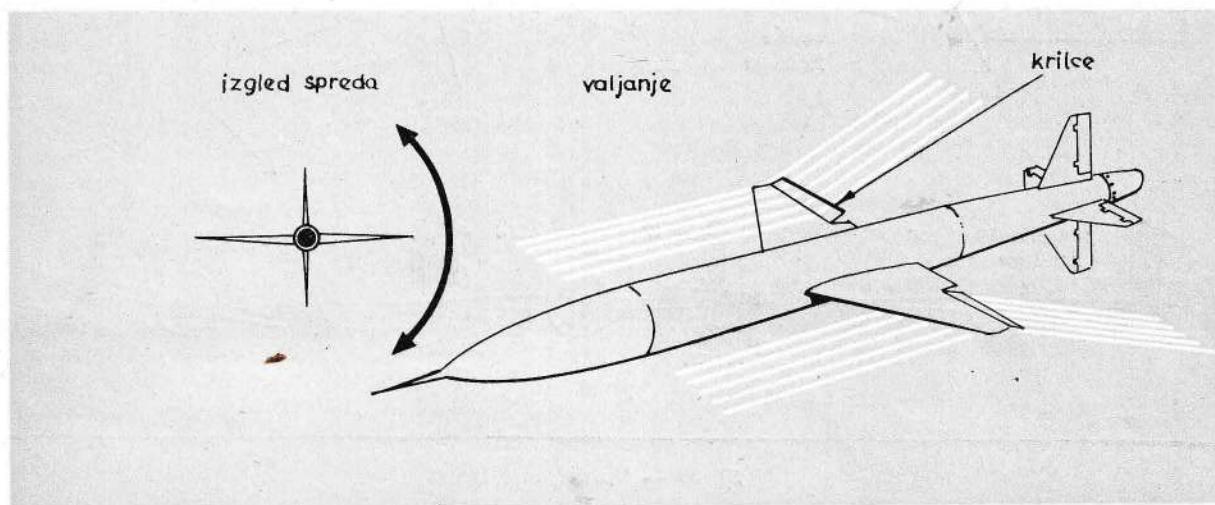
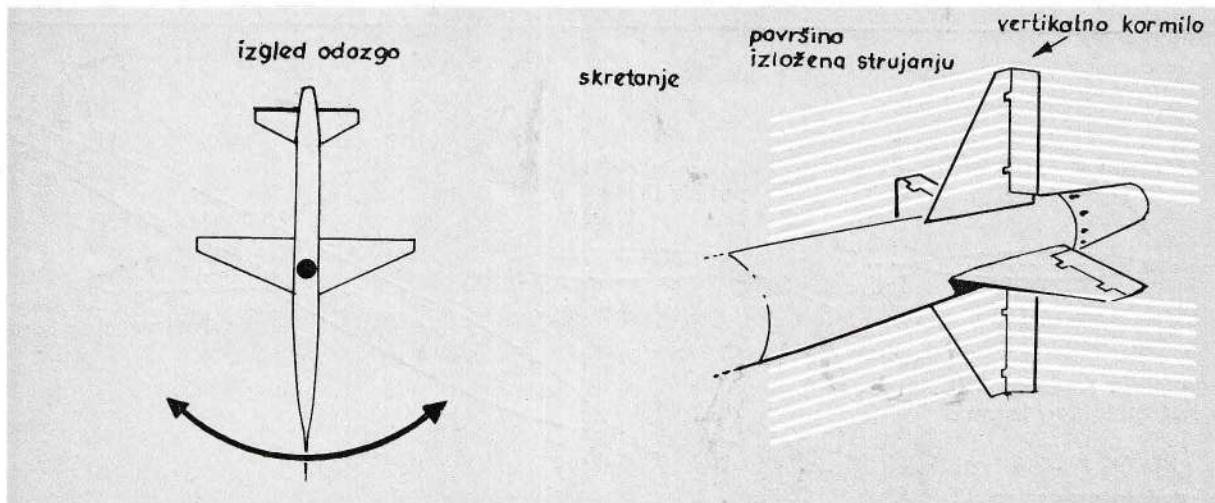
njem oko osovine skretanja, valjanju i propinjanju.

Upravljanje se postiže uz pomoć ranije već pomenutih komandnih površina time što one isturaju određenu površinu postojećem strujanju vazduha pod nekim uglom, što izaziva pojavu izvesne sile. Ova sila koja pritiskuje komandne površine pokreće krilo ili rep (za njih su vezane komandne površine) u pravcu suprotnom pokretanju komandnih površina. Komandne površine, zajedno sa pravcem kretanja nastalim usled pomeranja ovih površina, prikazane su na slici 38.

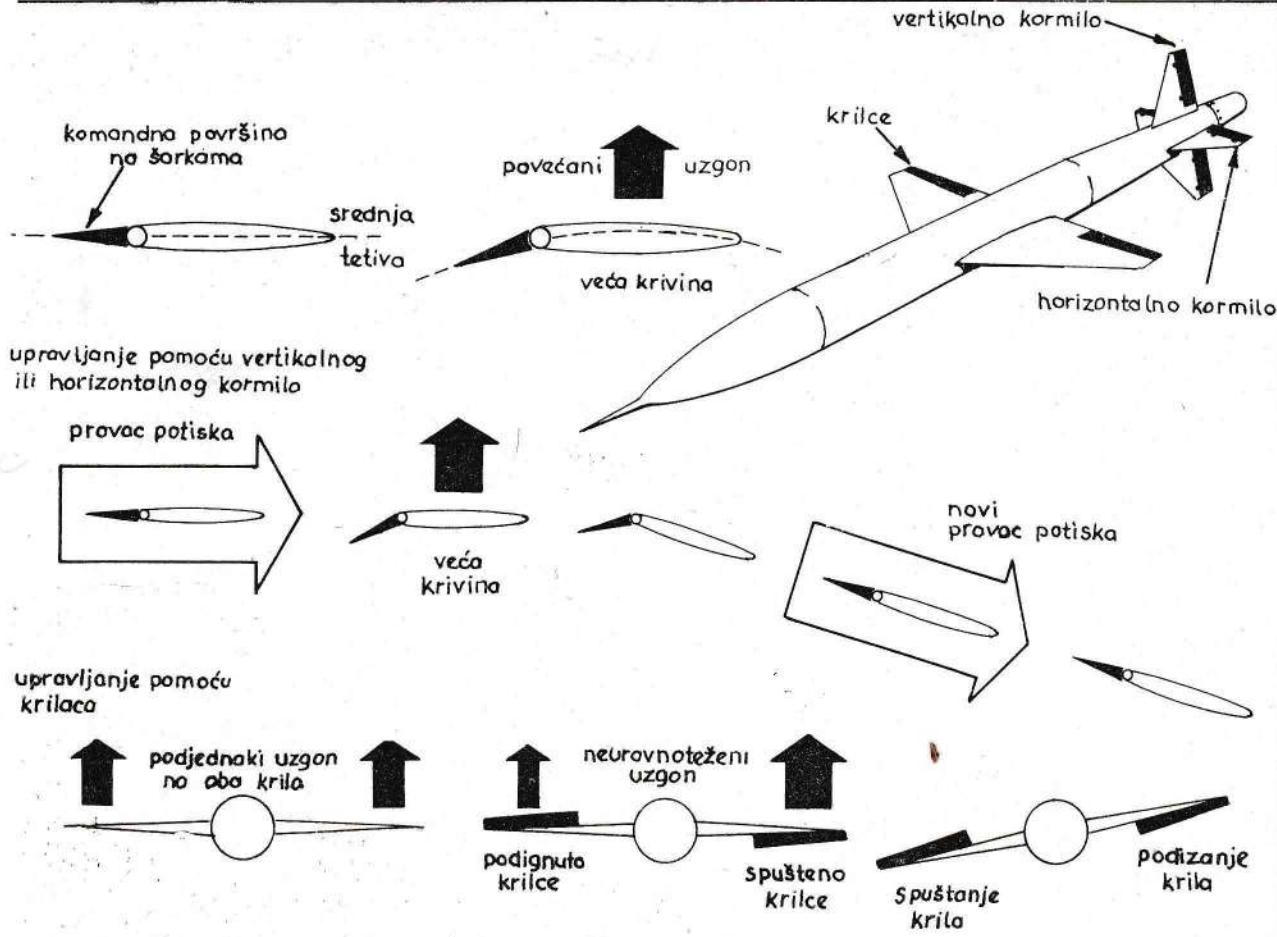
Krilo, horizontalni i vertikalni stabilizator mogu se smatrati delovima primarnih komandnih površina, pošto su osnovni faktori koji određuju putanju projektila. Ali, u ovoj diskusiji o komandnim površinama tretiraju se kao komandne površine i elementi koji teže da promene pravac kretanja.

Sekundarne komandne površine. U sekundarnu grupu komandnih uređaja ubrajuju se trimeri, spojleri i prorezi.

Trimeri se mogu podeliti u tri vrste: nepokretne, podešljive i pomoćne. Međutim, njihovo reagovanje u relativnoj vazdušnoj struji isto je u svim slučajevima. Oni, naime, uvek posredno utiču na upravljanje projektilom. Ali, oni sami ne određuju i pravac kretanja projektila. Na primer, pretpostavimo da je potrebno trimovati u propinjanju. Da bi se podigao vrh projektila,



Sl. 38 — Dejstvo primarnih komandnih površina



Sl. 39 — Upravljanje letom

trimer treba da bude oboren naniže. Primarna komandna površina, u ovom slučaju horizontalno kormilo, vezano je pomoću šarki za horizontalni stabilizator. Trimer je, opet, vezan šarkama za horizontalno kormilo. Malo pomeranje trimera na izlaznoj ivici horizontalnog kormila izaziva dejstvo izvesne sile na primarnu komandnu površinu. Rezultat dejstva ove sile je neznatno pomeranje horizontalnog kormila u suprotnom smeru; stoga, ako se trimer pokrene naniže, horizontalno kormilo će se podići naviše. Pošto projektil reaguje samo na pomeranje primarne komandne površine, rep će se spustiti, podižući na taj način vrh projektila (vidi sliku 39). Ova funkcija sasvim je ista i prilikom trimovanja po pravcu (u skretanju) i prilikom prečnog trimovanja (u valjanju).

Nepokretni trimer sastoji se od metalne ploče čvrsto povezane sa izlaznom ivicom primarne komandne površine. Ona je stalno savijena na takav način da trimuje let projektila. Trim-

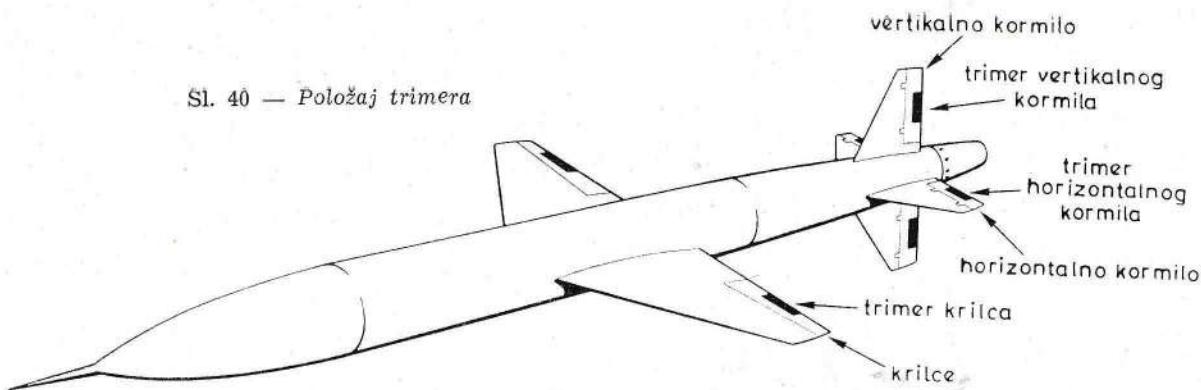
anje se vrši da bi se predupredili izvesni neravnotežni uslovi u odnosu na težiste letelice pri određenoj brzini.

Podešljivi trimer je složenije konstrukcije nego nepokretni i njime se može upravljati. Zato se trimovanje može i menjati ako se položaj, brzina ili visina promene.

Pomoćni trimer, ponekad poznat i pod imenom servotrimmer, uveliko se koristi kod velikih primarnih komandnih površina. Sile i naprezanje na komandnim uređajima znatno se umanjuju upotrebom pomoćnih trimera. Ova vrsta trimera direktno je povezana za komande. Zato, čim se sistem komandi stavi u pokret, trimer se takođe pokrene, i to najpre on. Pomeranje trimera izaziva pokretanje primarnih komandnih površina na uobičajeni način. Smatra se da posledica pokretanja trimera na primarnu komandnu površinu nastupa trenutno.

Nepokretni trimer se unapred postavlja kada je potrebno da postoje određeni uslovi sta-

Sl. 40 — Položaj trimera



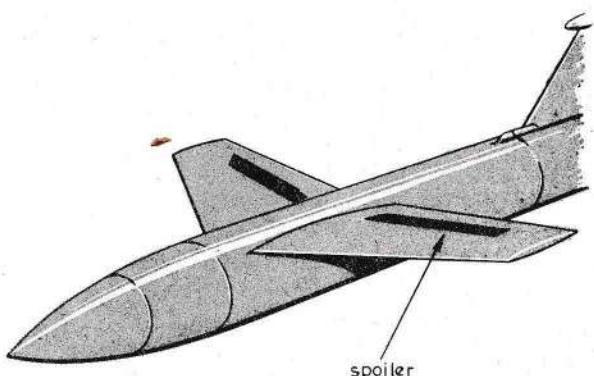
bilnosti. Podešljivim trimerom se može upravljati i njegov položaj može se po želji promeniti u širokom opsegu, za razne uslove. Pomoćni trimer pomaže da se pokrenu velike komandne površine. Pošto su sposobnosti i konstrukcija ove vrste komandnih uređaja dobro poznati, oni će i kod projektila verovatno biti primenjeni još za izvesno vreme. Ali, u slučaju nadzvučnih projektila moraće se razviti novi sistemi za aerodinamičko upravljanje.

Povećanjem brzina letelica bliže brzini zvuka, sposobnosti komandnih površina postajale su sve kritičnije. Komandna površina, u stvari, nije ništa drugo nego pokretni poklopac ili aeroprofil vezan za veću aerodinamičku noseću površinu koja može biti, kao što je ranije rečeno, krilo ili stabilizator. Inženjeri su ubrzo pronašli da se, pri brzinama iznad oblasti od 480 km/čas, na komandnim površinama javljaju karakteristične vibracije nazvane *flaterom*, osobito na krilcima. Ove vibracije postajale su sve snažnije sa porastom brzine, sve dok nisu, u izvenskim slučajevima, dostigle takve razmere, da su se komandne površine raspadale te ponekad izazivale i lom čitavog krila ili repne konstrukcije. Ova pojava suzbijana je u znatnom obimu povećanjem krutosti i čvrstoće primarnih komandnih površina, kao i statickim i dinamičkim uravnoteženjem ovih komandnih površina.

Jedan od načina da se spriječi lom krila može biti i korišćenje *spojlera*. Oni mogu biti načinjeni iz jednog dela ili niza delova koji mogu da prekinu stvaranje negativnog uzgona na krilu. Spojleri su uvučeni u gornji deo površine krila.

Spojler na slici 41 sastoji se iz čvrstog poklopca na šarke. Kada se spojler ne koristi, vazduh struji preko krila glatko i neprekidno, i na taj način se postiže puni uzgon krila. Međutim, pod pretpostavkom da je udar vetra doveo do spuštanja levog krila, sistem za upravljanje trenutno dovodi do podizanja spojlera na

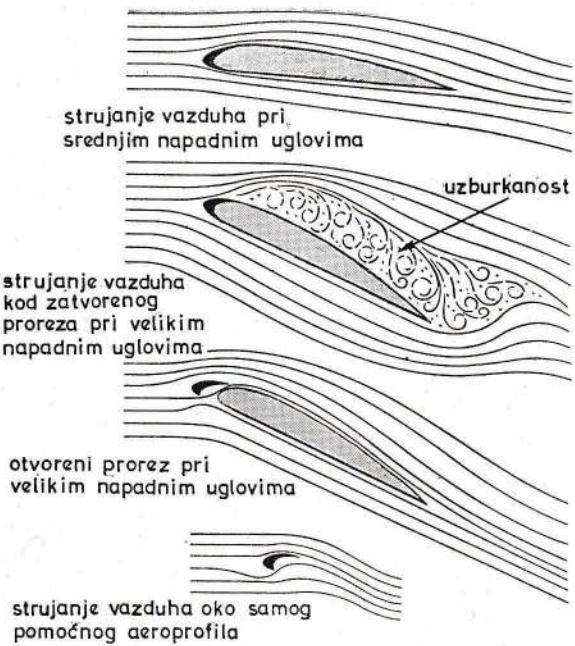
desnom krilu. Sa izvlačenjem spojlera negativna oblast uzgonske sile na desnom krilu biva poremećena, odnosno smanjena za znatnu veličinu, vrtloženjem koje je stvorio spojler. Krila stoga teže da se vrate u prvobitni položaj. Spojler može da pruža više otpora nego obično krilce; zato, kada se on izvuče, može da se javi momenat skretanja koji je dovoljno jak da izazove potrebu za istovremenim pokretanjem vertikalnog kormila istovremeno sa upravljanjem u valjanju.



Sl. 41 — Položaj spojlera na površini krila

Prorez je, u osnovi, uređaj za stvaranje velikog uzgona i nalazi se duž napadne ivice krila. U oblasti normalnih napadnih uglova prorez ne-ma nikakvog uticaja. Ali, kako je to pokazano na slici 42, kada projektil zauzme velike napadne uglove, prorez se može otvoriti da bi se omogućilo da vazduh prolazi kroz njega. Prorez ima ulogu upravo suprotnu onoj koju vrši spojler. To je koristan uređaj za povećanje poprečne stabilnosti, za sletanje letelica velikih brzina i za predupređivanje gubitka brzine kod sporih letelica.

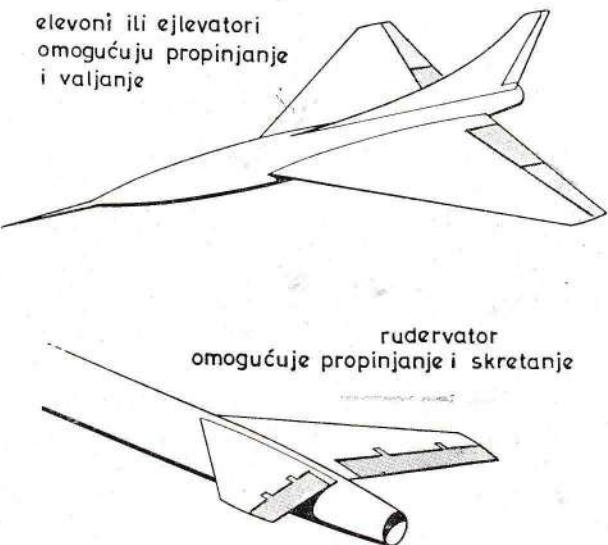
Jedna vrsta proresa radi automatski usled povećane razlike u pritiscima koja nastaje pri



Sl. 42 — Strujanje vazduha kod primene proreza

velikim napadnim uglovima. Nedostatak ovog mehanizma sastoji se u tome što mora da bude zatvoren sve dok je to potrebno, zbog toga jer bi ga manevri pri velikim brzinama koji zahtevaju velike napadne uglove automatski otvarali, čime bi se ozbiljno smanjile sposobnosti letelice, ili bi, čak, popustila konstrukcija proreza.

Komande sa dvojnom namenom. Sve dosad, komande o kojima je raspravljano bile su uobičajenog tipa. Sa povećanjem brzine projektila, razvijene su nove vrste komandnih površina.



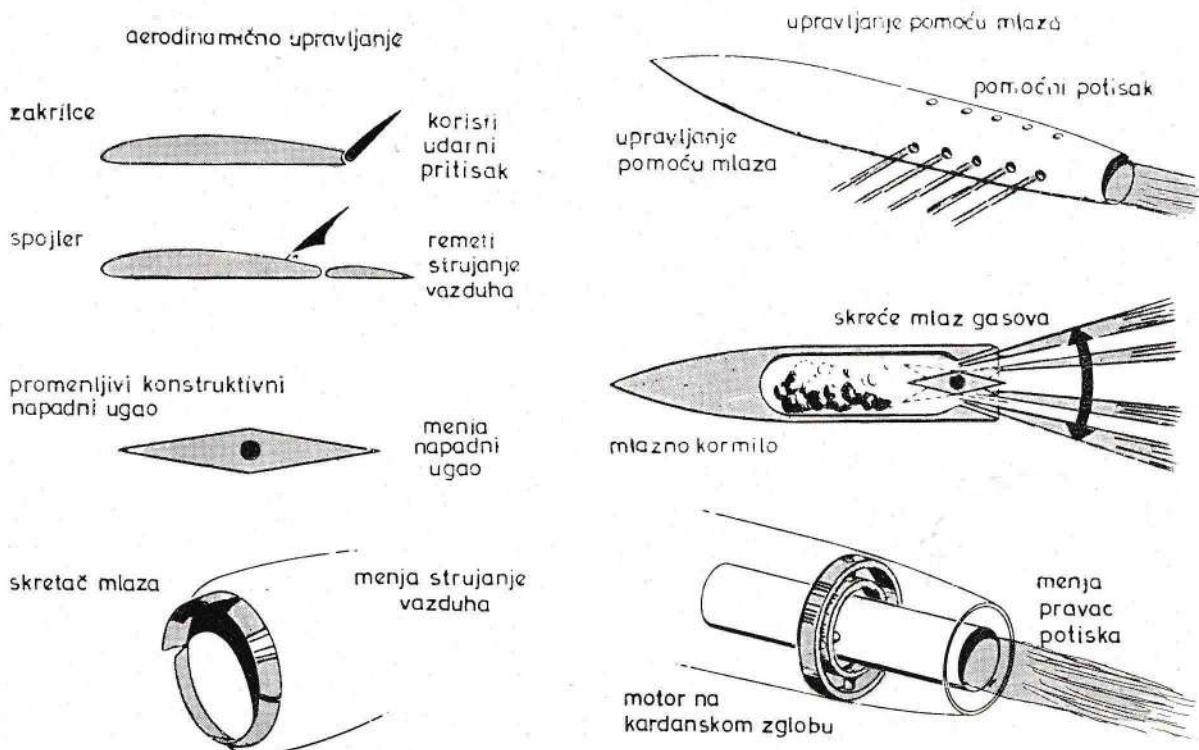
Sl. 43 — Komande sa dvojnom namenom

Novi tipovi primarnih komandnih površina su elevoni, radervatori i elevatori. Kao što nazivi to pokazuju, oni se sastoje od komandnih površina koje vrše dve uloge. Na primer, elevon zamenjuje horizontalno kormilo i krilce, obezbeđujući upravljanje u propinjanju i valjanju. Elevator je isto što i elevon. Radervatori se koriste za upravljanje u skretanju i propinjanju. To se može videti iz slike 43.

Upravljanje pomoću promenljivog konstrukcionog napadnog ugla. Da bi se rešili problemi lepršanja (flatera), ostvarila potreba za pojačanim komandnim površinama, a ipak zadržale komande dovoljno osetljive i efikasne u raznim oblastima brzina, ponekad se koristi i upravljanje uz pomoć promenljivog konstrukcionog napadnog ugla. Ovaj tip komandi koristi promenu položaja cele aerodinamičke noseće površine a ne samo jednog njenog dela. Ovim načinom izbegavaju se remeteći uticaji koji nastaju između dveju površina, kao što su površine pretkrilca i krila koje jedna s drugom zaklanjavaju izvensan ugao. Na velikim brzinama ova vrsta komandnih površina naročito je pogodna zbog toga što je dovoljno izvođenje samo neznatnih pokreta komandi pa da projektil znatno promeni svoj položaj. Upravljanje pomoću promenljivog konstrukcionog napadnog ugla može se koristiti kod krila, horizontalnog ili vertikalnog stabilizatora.

Konstrukcija »patka«. Konstrukcija tipa »patka« se sastoje od stabilizujuće površine i horizontalnog kormila postavljenih ispred težišta letelice, odnosno ispred njenih krila i osnovnih nosećih površina. U ranom razvoju letelica usvojeno je bilo, da je sa gledišta konstruisanja lakše postaviti repne površine na prednjem delu trupa. Ova tendencija održavala se godinama. Međutim, tip »patka« projektila primenjuju danas neki proizvođači u cilju vršenja ogleda. Prednje krilo može se sastojati iz stabilizujuće površine sa komandnom površinom vezanom za izlaznu ivicu, ili to može da bude pokretno krilo, u kom slučaju cela stabilizujuća površina ima promenljivi konstrukcioni napadni ugao (upravljanje pomoću promenljivog konstrukcionog napadnog ugla), bilo u pozitivnom ili negativnom smislu.

Kočnice za obrušavanje. Postoje dve vrste kočnica za obrušavanje: prva — koristi jedini poklopac na šarke koji radi kao površina koja pruža otpor, ili druga — koristi površinu sa prorezom za skretanje strujanja vazduha. Kočnice za obrušavanje se smatraju kao deo primarnih komandnih površina. Kao što to samo ime kaže, one se koriste da bi se saopštio efekat kočenja putem stvaranja povećanog otpora kod projektila i time usporio projektil.



Sl. 44 — Načini upravljanja

Upravljanje pri polaznim brzinama. Sve dok se ne dostigne brzina na kojoj aeroprofili imaju stabilizujući uticaj, mora da postoji neki način upravljanja drukčiji od upravljanja pomoću spoljnih komandnih površina. Ovi načini mogu se postići korišćenjem gasnih kormila ili upravljanjem pomoću mlaza.

Gasna kormila. Gasna kormila su površine postavljene usred mlaza gasova što ističu iz mlaznog motora. Kada se promeni položaj ovakvog kormila, ono skreće ističući mlaz gasova i izaziva usmeravanje potiska u smislu skretanja gasnog kormila. Brzine isticanja mlaza dovoljne su da omoguće upravljanje sve do trenutka kada je projektil postigao dovoljnu brzinu da od spoljnih kormila preuzme ulogu upravljanja. Zbog vrlo velike temperature u mlazu, vek gasnih kormila veoma je kratak.

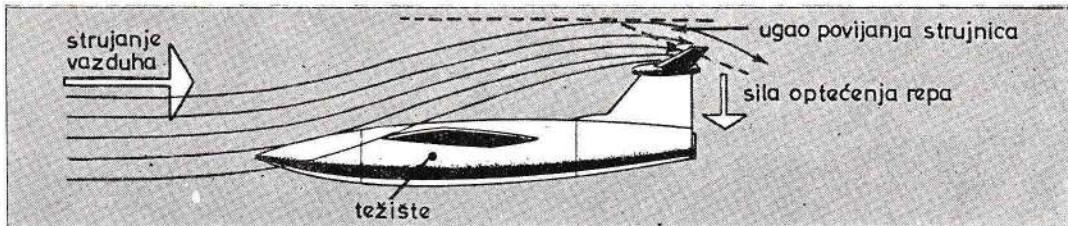
Upravljanje pomoću mlaza. Različiti sistemi upravljanja pomoću mlaza, prikazani na slici 44, razvijaju se za nadzvučni let. Jedna vrsta upravljanja pomoću mlaza ostvaruje se promenom položaja mlaznog motora, tako da daje željeni pravac kretanja. Ovaj postupak koristi motor postavljen na kardanski zglob. Dve ozbiljne zamerke ovom načinu su što je potrebno da se svi dovodi pogonskih materija učine savitljivim, a uređaj za upravljanje kojim se pokreće mlazni motor mora biti veoma snažan.

Lakši način upravljanja pomoću mlaza ostvaruje se postavljanjem više mlaznika po obodu projektila. Upravljanje se postiže upotrebom jednog ili više ovakvih mlaznika, po želji, čime se daju razni pravci potisku. Ovaj metod isključuje korišćenje komandnih površina, zahtevajući zato aerodinamički čistije površine projektila. Ovaj postupak ponekad se naziva i upravljenjem pomoću skretanja punjenja.

Upravljanje pomoću skretanja vazduha. Drugi način upravljanja jeste korišćenje skretića na uvodniku vazduha za motor. Skretić menja strujanje vazduha oko projektila, menjajući time pravac njegovog kretanja usled promene otpora. Međutim, ovo rešenje se retko koristi.

Primena specifičnih načina upravljanja kod vođenih projektila. Kao što je poznato, uobičajeni metod upravljanja letelicom u odnosu na njenu vertikalnu osu koristi vertikalno kormilo smešteno na repu. Slično tome, upravljanje u odnosu na poprečnu osu vrši se pomoću horizontalnih kormila postavljenih na repu. A upravljanje u valjanju obavlja se pomoću krilaca vezanih za izlaznu ivicu spoljnjeg dela krila, što je moguće bliže vrhovima krila.

Usled velike brzine kojom se kreću vođeni projektili, u opštem slučaju potrebno je upravljati projektilom pomoću komandi drukčijih



Sl. 45 — Povijanje strujnica

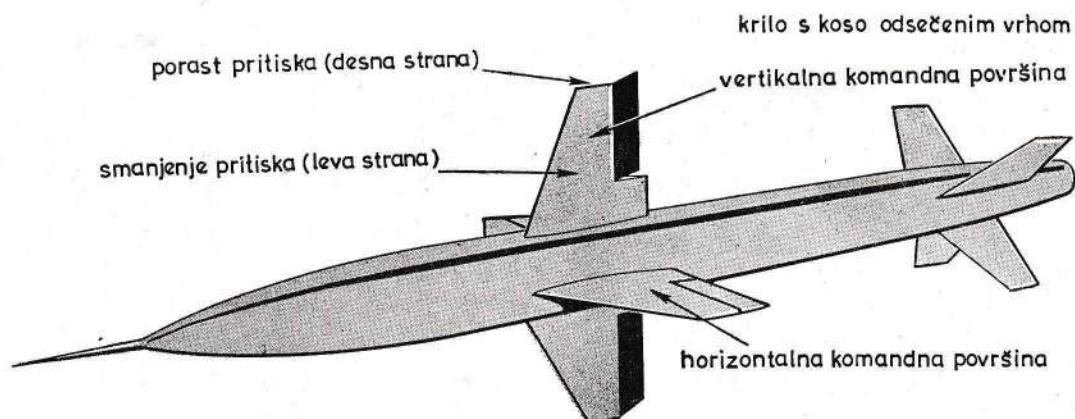
no u standardnim slučajevima. Na primer, u jednoj vrsti konstrukcije repne površine su nepokretne. Upravljanje po pravcu izvodi se pomoću zakrilaca postavljenih na izlaznoj ivici vertikalnih komandnih površina (vidi sliku 46). Kada se zakrilca pokrenu iz neutralnog položaja, tetiva ovog vertikalnog krila efikasno se menja za svaki napadni ugao, zavisno od ugao skretanja zakrilaca. Menjanje napadnog ugla stvara *diferencijalnu pritiske* na krilo, utičući time na uzgon. Ovo izaziva obrtanje projektila oko svoje vertikalne ose, kao i promenu pravca kretanja.

Popravka u valjanju izvodi se krilcima na vrhovima vertikalnih krila. Užlebljene vodice zadržavaju krilce na određenom napadnom ugлу u odnosu na tetivu krila. Kada se krilci pomeri, pozitivni napadni ugao proizvodi aerodinamički uzgon koji teži da ispravi svaku grešku u valjanju.

Promena stava projektila u odnosu na poprečnu osu izvodi se pomoću zakrilaca na njegovim horizontalnim krilima. Kada se zakrilaca spuste, povećanje uzgona teži da podigne nos projektila i, obrnuto, podizanjem zakrilaca spušta vrh projektila.

STABILNOST PROJEKTILA

Pošto stabilnost projektila neposredno utiče na ponašanje komandi, teži se da se održava visoki stepen stabilnosti. Pri povećanju brzine projektila nastaju znatne promene stabilnosti, prouzrokovane pomeranjem centra pritiska, a to unosi promene u strujanju koje se obavlja oko površina projektila. Čak i u čistom nadzvučnom strujanju, promene u Mahovom broju dovode do pomeranja centra pritiska. To se vidi iz sledećeg primera. Posmatrajući sliku 45 vidi se da se projektil nalazi u horizontalnom letu. On je uzdužno stabilan oko svoje poprečne ose koja prolazi kroz težište. Strujanje vazduha preko krila biva skrenuto naniže, prema horizontalnom kormilu. Ovaj ugao skretanja naziva se *ugalom povijanja*. Kada se uzgon smanji usled smanjene brzine, ovaj ugao povijanja takođe se smanjuje, izazivajući promene u pritisku. Tada se javljaju tačke u kojima nastaju nestabilni uslovi kao posledica ovih promena pritiska što potiče od različitih rasporeda strujanja. Kada nastanu uslovi koji se ne mogu kontrolisati, njima se moraju suprotstaviti komandne površine ili nagla promena brzine, sve do tačke stabilnosti.



Sl. 46 — Upravljanje po pravcu korišćenjem zakrilaca na vertikalnim komandnim površinama

Kao što se ranije vidojelo, nestabilni uslovi najčešće se pojavljuju pri okozvučnim brzinama. Većina projektila ima uređaje za upravljanje u obrušavanju i zaustavljanje u valjanju, da bi mogli da savladaju nestabilne uslove. Kao primer ovakvog uređaja je kombinacija u kojoj se horizontalne repne površine postavljaju visoko na vertikalnom stabilizatoru, da bi pomogle u savladavanju posledica povijanja strujnice.

Krilca i vertikalno kormilo takođe izazivaju razne nezgode. Nestabilno strujanje preko krilaca izaziva oscilisanje krilaca, stvarajući uslove za takozvano treperenje. Sličan uslov nazvan »vijuganje« (sneaking) može da nastane oko njihove uzdužne ose. Deo ovih neprilika može se suzbiti nepovratnim uređajima za upravljanje ili komandnim površinama sa promenljivim konstrukcionim napadnim uglom.

Sa povećanjem brzine i visina leta javljaju se novi problemi u stabilnosti. Potrebna je uska saradnja između aerodinamičara i konstruktora da bi se rešila ova pitanja.

AERODINAMIKA POGONA

Aerodinamika pogona obuhvata oblasti kao što su konstruisanje uvodnika vazduha za nabojnomlazne motore sa malim gubicima; konstruisanje dozvučnih difuzora, mlaznika i izduvne cevi; kao i uticaj mlaza izduvnih gasova na otpor i strujanje oko tela projektila. Aerodinamičkomehanički problemi kontrolisanog priticanja goriva, regulisanje uvođenja potrebine količine pritičućeg vazduha i stabilnost unutrašnjeg strujanja i procesa sagorevanja moraju takođe biti uzeti u obzir. S novim dostignućima u razvoju pogonskih uređaja, moći će se koristiti u većoj meri upravljanje pomoću mlaza, uklanjajući potrebu za spoljnim komandnim površinama. Ovo odstranjenje aerodinamičkih površina vrši se danas osobito na vođenim projektilima, konstruisanim za let po balističkoj putanji.

Iako se na aerodinamičkim poboljšanjima ne prestano radi, prilikom izrade ovih konstrukcija nailazi se na velike teškoće da se dobiju praktični oblici koji su u stanju da stalno lete nadzvučnom brzinom. Međutim, aerodinamičko konstruisanje zaostaje danas za usavršavanjem pogonskih uređaja koji su već sposobni da pruže ogromne potiske.

UTICAJI ATMOSFERE NA LET

Zbog veće gustine vazduha na malim visinama, razvija se znatan otpor pri kretanju projektila velikom brzinom. Kao posledica toga,

mlazni motor nije dovoljno efikasan na tim visinama, usled toga što se najveći deo potiska troši na savlađivanje otpora a ne na ubrzavanje. Otpor projektila se menja sa kvadratom njegove brzine. Kada projektil dostigne svoju najveću brzinu, vrednost razvijenog potiska jednaka je veličini otpora.

Na velikim visinama preovlađuju uslovi male gustine, omogućuju porast brzina, pošto se potisak koristi više za ubrzavanje a manje za savlađivanje otpora. Na malim visinama, mlazni motor obezbeđuje energiju za savlađivanje otpora vazduha i zemljine teže, kao i za ubrzavanje projektila, dok na većim visinama motor daje energiju potrebnu za savlađivanje zemljine teže i ubrzavanje letelica. Dijagram na slici 47 pokazuje promenu pritiska, temperaturu i gustine vazduha koja se dešava s povećanjem visine.

Stratosfera se smatra oblaštu u kojoj se obavljaju svi letovi projektila velikog dometa. Stratosfera, koja se nalazi izvan granica tropske atmosfere, je oblast konstantne temperature i neznatne vazdušne konvencije. Obavljanjem letova u stratosferi koriste se prednosti malog otpora, velike brzine, male potrošnje goriva i većeg dometa. Smetnje za let u ovoj oblasti su niske temperature koje ovde preovlađuju i oskudica u kiseoniku.

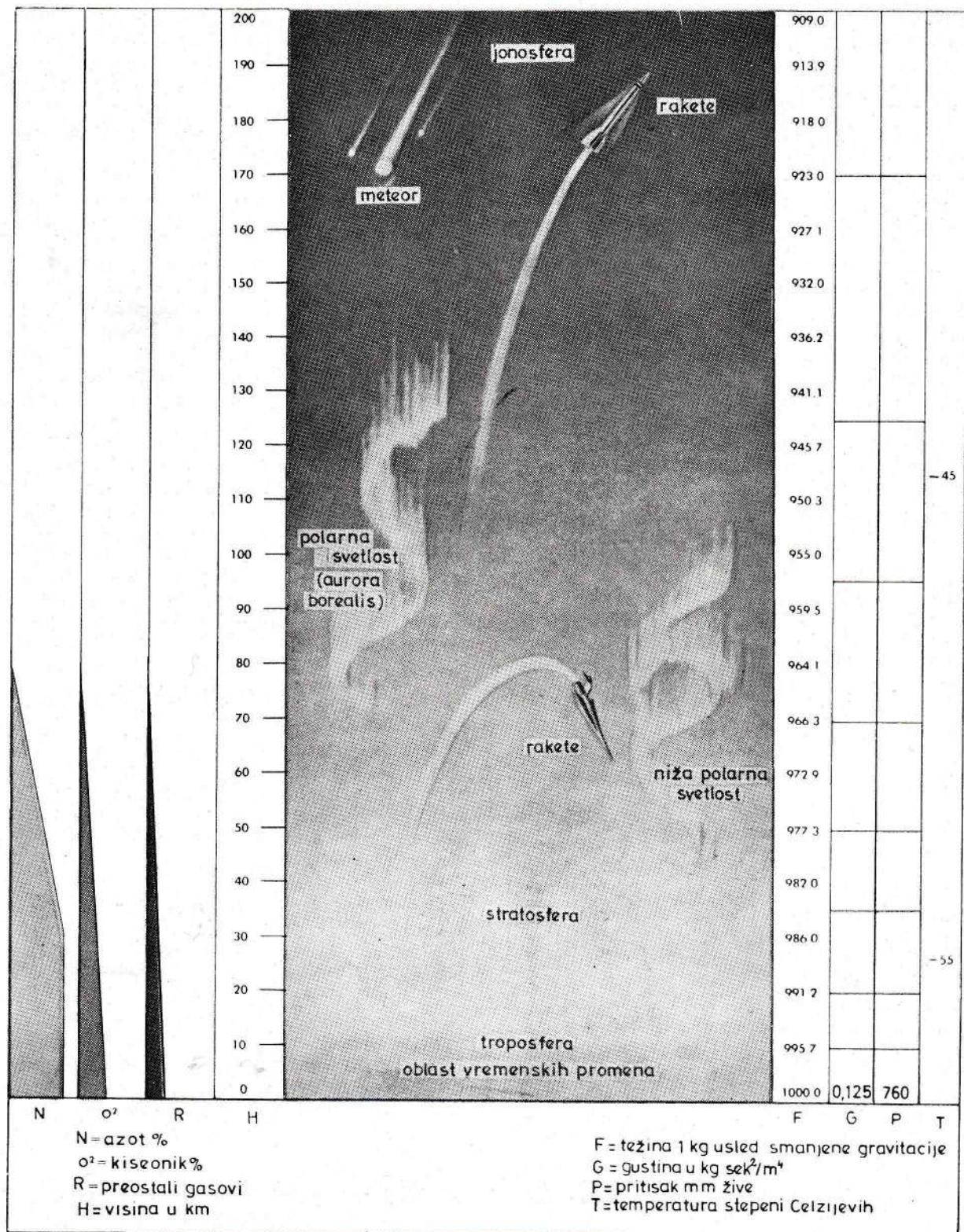
TEHNIKA PROUČAVANJA AERODINAMIKE VELIKIH BRZINA

Tehnika proučavanja aerodinamike velikih brzina jeste jedan od najvećih problema nadzvučne aerodinamike. Razvijanje projektila namenjenih nadzvučnim brzinama zahteva posebne postupke i naročitu opremu. Nove konstrukcije aerotunela pomažu da se ovaj problem reši.

Aerotuneli. Dok su aerotuneli neko vreme bili upotrebljavani velikim uspehom u dozvučnoj oblasti, bilo je potrebno poboljšati ih i povećati, da bi se zadovoljili zahtevi razvoja projektila.

Čim projektil dostigne brzinu od 1 maha, moraju se uzeti u obzir uticaji udarnog talasa. Izazivanjem takvim brzinama u aerotunelu, nađeno je da se udarni talasi odbijaju od tunelskih zidova. Zato prečnik aerotunela mora da bude vrlo veliki, da bi se stvorili uslovi za stvarni let.

Nova tehnika u konstruisanju aerotunela uklonila je odbijanje talasa ili efekta prigušenja. Problem konstruisanja nadzvučnih aerotunela nije umnogome bio tako veliki kao problem podzvučnih aerotunela, ali je nastalo usko grlo u razvoju zbog okozvučnih brzina.



Sl. 47 — Karakteristike atmosfere

Prigušenje u aerotunelu, efekat razmere ili Rejnoldsov broj koji su dotad bili dobro poznati uzeli su nove vidove u okozvučnoj oblasti. Isход испитivanja u razmeri smanjenih modela nije više mogao da daje zaista pouzdane rezultate. Prema tome, bilo je potrebno razviti veće nadzvučne aerotunele. Konstruisani su aerotuneli koji primaju kompletne projektilne manje veličine. Ipak, veći projektili ispituju se najčešće deo po deo, a pri tom se koriste delovi u pravoj veličini. Slika 48 pokazuje u osnovnim crtama izgled jednog aerotunela.

Izveštaj o ispitivanjima u aerotunelu. Evo nekih odlomaka izveštaja o izvršenim ispitivanjima u aerotunelu:

... Izvršeno je osam merenja pri Mahovom broju 2,23 da bi se izmerilo smičuće naprezanje usled uzburkanog graničnog sloja duž ravne ploče, kao i u cilju dobijanja slike o ukupnom pritisku kroz granični sloj. Ploča je ispitana pri napadnim uglovima od 0, -1,25 i -3 stepena, da bi se promenio efektivni Mahov broj u slobodnom strujanju ...

... Izvršeno je trideset i pet merenja pri Mahovom broju 1,73 da bi se dobili podaci o stabilnosti, upravljivosti i otporu složene konfiguracije modela u razmeri 1/82,5. Model je postavljen na vagu za pokazivanje valjanja, da bi se zabeležili podaci o svih šest komponenata između - 8 i + 12 stepeni indiciranog napadnog ugla, pri položajima u valjanju od 0 do 90 stepeni. Ispitano je jedanaest površinskih skretanja pri 0, -6 i -10 stepeni.

Ovi primeri daju izvesnu sliku o tome šta je sve uključeno u hiljade ogleda koji se moraju izvršiti tokom razvoja jednog projektila.

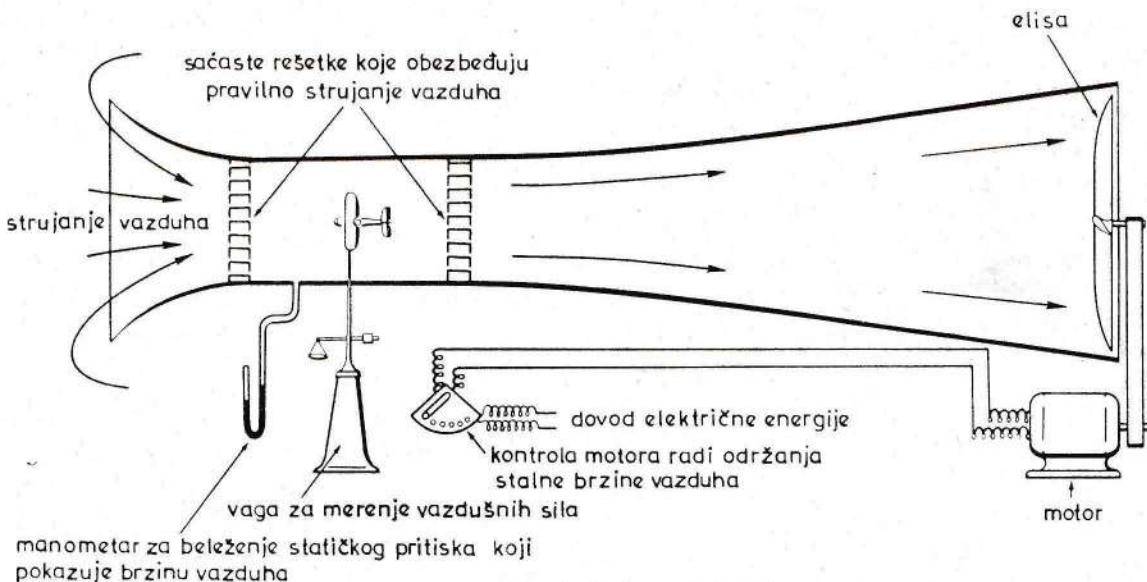
Pa iako je poslednjih godina ispitivanje projektila poboljšano u znatnoj meri, bez sumnje je da će se u budućnosti ukazati potreba za još novijim metodama ispitivanja.

IZVEŠTAJI O REZULTATIMA RAZVOJA VOĐENIH PROJEKTLA

Tokom razvoja svakog projektila, objavljaju se periodični izveštaji koji obelodanjuju nova rešenja i rezultate dobijene ispitivanjem modela. Delovi ovakvih izvršenja dati su u daljem tekstu. Primeri su tako odabrani, da se iz njih može sagledati sva složenost pitanja sa kojima se susreću konstruktori tokom razvoja novih projektila.

Niže su prikazani primeri tehničkih izveštaja o rezultatima razvoja jednog projektila i ono ukazuje na razne utičuće faktore:

... Taktički zahtevi koji se odnose na ovaj vođeni projektil jesu da taktička verzija projektila bude u mogućnosti da ponese bojnu glavu tešku 900 kg i da ima domet od približno 1600 km. Takođe se želi da taktička verzija uđe u proizvodnju u najkraćem mogućem roku. To čini preporučljivom upotrebu uobičajenih i već proverenih konstrukcija. Da bi se mogao koristiti pouzdan i već proveren motor, izabrana je niska nadzvučna brzina koja je dozvolila korišćenje konvencionalnog turbomlaznog motora.



Sl. 48 — Konstrukcija aerotunela

Za brzinu kruženja izabrano je 0,85 maha. Ova brzina je smanjila mogućnost uništenja projektila. Dopunsko smanjenje ranjivosti ostvareno je izborom velike visine kruženja od 18.000 m. Veliko jedinično opterećenje krila praktično je onemogućilo da se usvoje visine kruženja iznad 18.000 m.

Pošto projektil treba da dostigne nadzvučnu brzinu u završnom oborušavanju na cilj, bilo je potrebno da raspolaže dobim osobinama u pogledu stabilnosti i upravljivosti, kako u okozvučnoj, tako i u nadzvučnoj oblasti. Ovi zahtevi za velikim brzinama takođe su tražili aerodinamičku čistu konstrukciju.

Da bi se postigla takva čista konstrukcija, odlučeno je da se usvoji simetričan oblik celog projektila. Simetrična konstrukcija projektila je poželjna u okozvučnoj oblasti brzina, jer ima prednosti u uslovima oborušavanja pri nultom uzgonu.

Opredeflilo se na oštru strelu krila i malu vitkost, da bi se poboljšale osobine pri velikim brojevima Maha. Usvojeni su tanki i simetrični aeroprofili, što je takođe doprinelo sposobnosti pri velikim brzinama. Postojanje krila sa strehom unazad omogućilo je uklanjanje horizontalnih repnih površina, pošto se upravljanje u odnosu na poprečnu osovinu moglo postići i pomoću izlaznih ivica krila. Elevatori, dakle, obezbeđuju potrebnu bočnu i uzdužnu upravljivost. Uklanjanje horizontalnih repnih površina znatno je uprostilo konstrukciju i otklonilo probleme strujanja vazduha koji bi se inače pojavljivali. Ono je, takođe, uklonilo i druge probleme na koje bi se naišlo pri konstruisanju posebnih komandnih površina, da bi se postigao istovetan Mahov broj. Elevatori su postavljeni blizu trupa, što je smanjilo dužinu veza kroz trup do njihovih pokretača.

Konstruisanje vertikalnih repnih površina proizilo je iz istih razmatranja kao pri izboru aeroprofila krila. Postignuta je dobra stabilnost pravilnim postavljanjem jednostrukih vertikalnih repnih površina. Razmotrena je i mogućnost korišćenja dvostrukih repnih površina, ali pošto se želelo da se ugraditi stajni trap za eventualno spasavanje projektila posle leta, napuštena je mogućnost korišćenja duplog repa. Pošto su troškovi ispitivanja projektila u letu i inače vrlo veliki, isplatilo se postavljanje ovog stajnog trapa.

Razmatran je odgovor na komande, pri brzini kruženja, da bi se uverilo da projektil raspolaže željenim osobinama pri manevrisanju. Odlučeno je da se koriste zaokreti pod nagibom, pošto drugo rešenje nije bilo zadovoljavajuće (zaokret klizanjem). Ovaj izbor izazvao je, do-

duše, neke komplikacije i autopilota i u uređaju za upravljanje...

Sledeća diskusija mogla bi biti tipična za drugi izveštaj o rezultatima razvoja drugog, znatno manjeg projektila nego što je onaj o kome je već bilo reči:

... Kod ovog projektila osnovno je bilo pitanje veličine i oblika. Stoga je pažnja bila usredsredena na broj, veličinu i mesto postavljanja komandnih površina. Konstruisanje projektila određene veličine i oblika izaziva pojавu posebnih aerodinamičkih problema. Faktori od najveće važnosti su oni koji se tiču otpora, stabilnosti i lakoće u manevrisanju.

Želelo se da projektil pokazuje dobru stabilnost pri malim brzinama i nepovoljnim vetrovima. Izabrano je delta krilo sa velikom strehom unazad, da bi se obezbedili željeni uzgon i stabilnost na malim brzinama, kao i željena gornja granica brzine od 3 Maha. S obzirom na to da noseće površine gube uzgon na velikim brzinama, izabrano krilo pokazivalo je zadovoljavajuće sposobnosti pod svim uslovima.

Da bi se ograničila ukupna dužina projektila, odlučeno je da se odstrane repne površine i koriste četiri simetrično postavljena krila. Uređaji za upravljanje su prilagođeni da mogu da funkcionišu sa planiranim oblikom.

Da bi se lako manevrisalo projektilom sa malim nosećim površinama, rešeno je da se, pored postojećih komandnih površina na krilima, upotrebe i pokretljiva gasna kormila. Ova gasna kormila postavljena su u izduvanom mlažu motora i vezana su bila direktno za ove komandne površine. Gasna kormila obezbeđivala su dobru upravljenost pri malim brzinama, preno što su površine krila postajale aerodinamički efikasne. Ova gasna kormila bila su presvučena grafitnom oblogom, da bi izdržala visoke temperature mlaza motora...

Iz gornjih izlaganja može se lako videti da su razmatranja pri konstruisanju projektila mnogobrojna i raznolika. Vidi se da nijedan problem nije usamljen kada se razvija neki novi projektil.

TEŽNJE U KONSTRUISANJU PROJEKТИLA

Sve do danas, pri konstruisanju trupa projektila, ostvaruje se ubičajeni poluljuskasti a takođe i potpuno ljkusti oblici. Poluljuskasti tip obično raspolaže sa četiri uzdužnice i sporednim elementima vezanim za te uzdužnice. Kod potpuno ljkastog oblika, konstrukcija u potpunosti zavisi od noseće kore, vezane za spo-

redne sastavne delove, koja tako obrazuje konstrukciju u obliku ljeske.

Novi metal koji se uzima u obzir za prekrivanje konstrukcija je titan. Ovaj metal je za oko 60% teži od aluminijuma, ali ima samo oko polovinu težine čelika. Njegove legure su nekoliko puta jače od aluminijuma, tako da se mogu meriti sa najboljim legurama čelika. Titan se može koristiti umesto aluminijuma za konstrukcije tipa noseće kore, kao i za neke druge noseće delove. Osnovni nedostatak danas leži u vrlo visokoj ceni njegovih limova.

Druga značajna osobina titana je njegova otpornost na visoke temperature. Problem površinskih temperatura bio je već ranije spomenut u vezi sa pitanjima konstrukcije. Osim toga, porast temperature predstavlja ozbiljan problem zbog prevremenog aktiviranja bojnih glava, sagorevanja u vodovima za gorivo i oštećenja opreme. Titan se može koristiti u oblasti temperature od 300^o do 800^o stepeni Celzijusovih koje se sreću pri okozvučnim i nadzvučnim brzinama.

Praktično uvek, projektili konstruisani za borbenu upotrebu nisu namenjeni spasavanju. Zato i nema potrebe da se snabdevaju stajnim trapovima. Međutim, u fazama istraživanja i razvoja, ekonomično je postaviti na njih uređaje za spasavanje projektila. Takođe je od bitne važnosti spasavanje projektila koji će se koristiti za izviđanje.

Osim upotrebom stajnog trapa, projektili se mogu spasavati i na druge načine. Može se koristiti i padobran za spuštanje na zemlju vodenih projektila sa eventualnim malim oštećenjem. Drugi način za spasavanje projektila je postavljanje dugog vrha na njegov nos. Vrh teži da apsorbuje energiju pri udaru tokom pri-

zemljenja. Ova vrsta prizemljenja ima, međutim, vrlo ograničenu primenu.

Način koji najviše zadovoljava pri spasavanju projektila je upotreba jednog od tipova stajnih trapova. Stajni trapovi mogu imati točkove ili neku vrstu skija.

Čim se stajni trapovi primene kod projektila, stvara se niz drugih problema pri konstruisanju. Mora se, pre svega, obezbediti odgovarajući prostor u unutrašnjosti projektila za mehanizam stajnih trapova. Osobine stabilnosti znatno se menjaju i moraju se uzeti u obzir sve promene koje mogu da nastanu kao posledica dodavanja stajnog trapa.

Kao što je već istaknuto, većina bojnih projektila nema nikakav stajni trap ili neko drugo sredstvo za spasavanje, pošto predstavljaju letelice za jednokratnu upotrebu. Sav raspoloživi prostor u njima koristi se, prema tome, za uređaje za vođenje i upravljanje, za gorivo, oksidator i bojnu glavu.

I ovde, pri razvoju konstrukcija projektila, mogu se očekivati stalna poboljšanja. Novi materijali i metodi konstruisanja nastaviće da povećavaju efikasnost projektila.

VI I AERODINAMIKA

U ovoj glavi data je opšta slika pitanja u vezi sa oblašću aerodinamike. Kao što se vidi, izlazilo bi iz okvira svakog sličnog teksta pokrivanje svih oblasti aerodinamike do u najmanje pojedinsti.

Pri radu u raketnim jedinicama neće biti potrebno da potpuno poznajete aerodinamiku. Ali, naći ćete da je korisno da razumete osnovne postavke aerodinamike koje su ovde iznete.

Pogon vođenih projektila

Vođeni projektili se moraju kretati velikom brzinom kako bi se smanjila mogućnost da ih presretnu i unište protivdejstva protivnika. Vođeni projektili moraju takođe biti sposobni da presretnu u letu i unište brze protivničke projektile i avione. Sve doskora su mlazni motori bili glavno sredstvo upotrebljavano za pogon letelica nadzvučnom brzinom.

Do početka II svetskog rata kombinacija klipni motor-elisa uglavnom je zadovoljavala za pogon aviona. Međutim, kako su brzine rasele, kombinacija se pokazala nezadovoljavajućom, pošto se potisak elise smanjivao, brzo do stigavši određenu brzinu leta. Takvi uslovi su zahtevali izvanredno velike motore za razvijanje dovoljno snage radi daljeg povećanja brzine. Kada su se još dostigle zvučne brzine letenja, udarni talasi na vrhovima elisa su učinili da se vučna sila osetno smanji. Čak i pored toga što su istraživanja na razvoju elisa pokazala da se dosta od pomenutog ograničenja može prebroditi, danas je neophodno da se upotrebni mlazni pogon za velike podzvučne i nadzvučne brzine.

OSNOVNE JEDNAČINE I ZAKONI RAKETNOG POGONA

»Raketni pogon se zasniva na principu promene količine kretanja materije koja ističe iz letelice i pri tome ostvaruje njen kretanje«.

Zbog te definicije raketnog pogona često se može čuti kako se raketni motori nazivaju reaktivnim. Ovaj naziv nije baš najpodesniji, pošto svako telo koje se samo kreće kroz odgovarajući fluid koristi princip reakcije. Tako, na primer dejstvo elise se zasniva na povećanju

količine kretanja vazduha (koju ona ubrzava), što ima za posledicu pojave sile reakcije — vučne sile.

Klasični avioni pogonjeni elisom ne pripadaju mlaznom pogonu pošto radni fluks ne ističe iz letelice. Ako bi se radilo o kanalisanoj elisi, pri čemu bi vazduh proticao kroz letelicu, onda bi se to moglo nazivati »mehaničkomlaznim pogonom«. Nijedan od mlaznih motora ne koristi ovaj mehanički način.

Za razumevanje principa na kome se zasniva mlazni pogon važno je učiniti malu matematičku analizu zakona po kome se stvara potisak mlaznog motora. II Njutnov zakon kazuje da se telo ubrzava u pravcu sile koja na njega deluje. Postignuto ubrzanje je upravno proporcionalno sili, a obrnuto proporcionalno masi tela. Prema tome, obrazac za silu je:

$$F = M \cdot a \dots \dots \dots \quad (1)$$

gde je »F« sila, »M« masa tela, a »a« ubrzanje.

Zemljina teža privlači svaku masu gravitacionom silom, koja se menja sa geografskim položajem, tj. sa odstojanjem od zemljinog središta. Ta sila se naziva težinom. Zbog tako promenljive težine tela neophodno je u matematičkim izrazima upotrebljavati sledeću jednačinu za masu:

$$M = \frac{W}{g} \dots \dots \dots \quad (2)$$

gde je »W« težina u kg, a »g« gravitaciono ubrzanje u m/s². Na takav način definisana masa ostaje konstantna, pošto se i »W« i »g« menjaju na sličan način.

Prema jednačini »a« je mera promena brzine »v« i može biti izražena sa:

$$a = \frac{v_2 - v_1}{t} \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

gde je » v_1 « početna brzina neke mase, » v_2 « konačna brzina iste mase, a » t « vreme potrebno za promenu brzine od » v_1 « do » v_2 «. Sada se polazna jednačina $F = Ma$ može napisati kao:

$$F = \frac{Mv_2 - Mv_1}{t} \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

Pošto se izraz » Mv « naziva količinom kretanja, to se može reći da je potisak mlaznog motora ravan promeni količine kretanja radnog fluida. Gornja jednačina se često piše kao:

$$F = m(v_2 - v_1) \quad \dots \dots \dots \quad (5)$$

gde » m « predstavlja » M/t « — protok mase radnog fluida u jedinici vremena. Zamenom jednačine 2 u jednačinu 1, II Njutnov zakon se može napisati sa:

$$F = \frac{W}{g} a \quad \dots \dots \dots \quad (6)$$

Primenjujući tu jednačinu na mlazni pogon, » F « je sila koja ubrzava radni fluid kroz mlaznik, dok je » a « ubrzanje toga fluida. Prema III Njutnovom zakonu potisak mlaznog motora (T) je jednak, a po smeru suprotan pomenutoj sili (F).

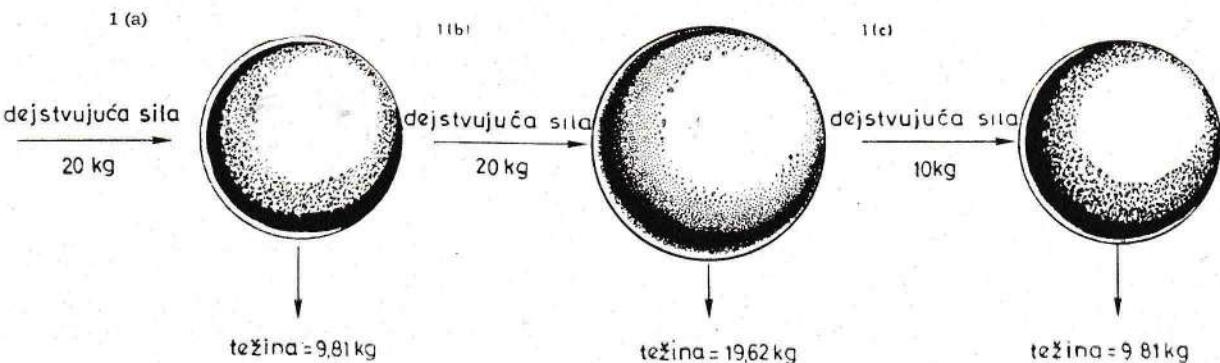
Ako se stavi da je » W « ukupna težina fluida koji prođe kroz motor za vreme » t «, onda je $w = W/t$ — protok fluida u kilogramima u sekundi. To znači da se jednačina za potisak može izraziti u ovom obliku:

$$T = \frac{w}{g} (v_2 - v_1) \quad \dots \dots \dots \quad (7)$$

gde je:

T — potisak u kilogramima,

w — težinski protok fluida u kilogramima u sekundi,



v_1 — ulazna ili početna brzina radnog fluida u m/s ,

v_2 — izlazna ili konačna brzina radnog fluida,

g — ubrzanje teže ($9,81 m/s^2$).

Iako se gornjom jednačinom u stvari obraćunava sila koja se saopštava radnom fluidu, ona ipak predstavlja izraz za силу потиска која »gura« motor kroz prostor.

Primeri primene II Njutnovog zakona su pokazani na slici 49. Prva slika pokazuje jedno telo težine $9,81 \text{ kg}$, koje dobija ubrzanje od 20 m/s^2 usled dejstva sile od 20 kg . Srednja slika prikazuje telo dva puta veće težine od prethodnog, ali na koje dejstvuje sila iste veličine (od 20 kg); treba primetiti da je ubrzanje tog tela upola manje, tj. da iznosi 10 m/s^2 . Treća slika ponovo pokazuje telo težine $9,81 \text{ kg}$, ali pod dejstvom sile od 10 kg . Ubrzanje je i ovde dva puta manje u odnosu na tela prikazana na prvoj slici.

$$F = \frac{W}{g} a$$

$$20 \text{ kg} = \frac{9,81 \text{ kg}}{9,81 \text{ kg/s}} 2a$$

$$20 = 1a$$

$$a = 20 \text{ m/s}^2$$

$$F = \frac{W}{g} a$$

$$20 \text{ kg} = \frac{19,62 \text{ kg}}{9,81 \text{ m/s}^2} a$$

$$20 = 2a$$

$$a = 10 \text{ m/s}^2$$

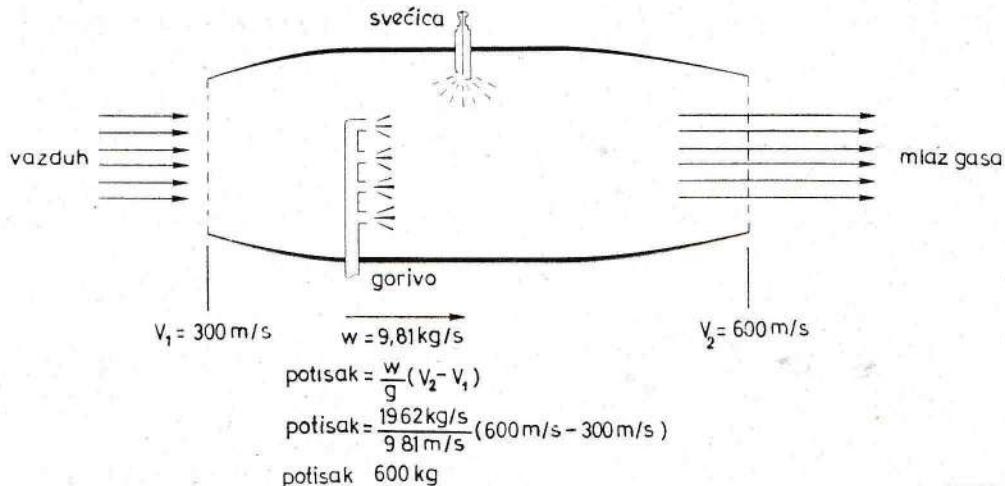
$$F = \frac{W}{g} a$$

$$10 \text{ kg} = \frac{9,81 \text{ kg}}{9,81 \text{ m/s}^2} a$$

$$10 = 1a$$

$$a = 10 \text{ m/s}^2$$

Sl. 49 — Primeri II Njutnovog zakona kretanja



Sl. 50 — Praktičan primer II Njutnovog zakona

Na mlaznom motoru, prikazanom na slici 50, sila koja ubrzava fluid je indirektno stvorena putem hemijske reakcije između vazduha i goriva. Treba primetiti da se ubrzanje saopšteno radnom fluidu ispoljava povećanjem brzine od v_1 do v_2 . Potisak koji »gura« motor napred je ravan po veličini, ali suprotnog smera od sile koja ubrzava fluid prema nazad. Ova slika je tipičan primer primene II Njutnovog zakona kretanja za objašnjenje nastajanja sile potiska u mlaznom motoru.

U raketnom motoru, čiji se radni fluid (pogonska materija) nosi u raketni, početna brzina (v_1) ravna je nuli. Prema tome, obrazac za potisak kod raketnog motora je:

$$T = \frac{w}{g} v_2 \quad \dots \dots \dots \dots \quad (8)$$

Uočljivo je da se potisak uvek izražava kao sila u kilogramima, a ne u obliku rada ili snage. Mlazni motor koji radi na zemlji ne kreće se, prema tome ne vrši koristan rad, niti razvija korisnu snagu. Snaga potiska raketnog motora rakete u kretanju može se sračunati pomoću sledećeg izraza:

$$\text{Snaga potiska u KS} = \frac{\text{Brzina raketne (m/s)} \times \text{Potisak (kg)}}{75} \quad (9)$$

Tako, na primer, raka V-2 koja ima potisak od 25.000 kg, a pošto se kreće brzinom od 1840 m/s, razvija snagu potiska od:

$$\frac{1840 \cdot 25000}{75} \cdot 61500 \text{ KS} \quad \dots \dots \dots \quad (10)$$

Važno je ponovno napomenuti da se kod mlaznih motora češće upotrebljava izraz potisak, nego snaga izražena u konjskim snagama.

Jedno vrlo često pogrešno tumačenje je da mlazni motori, a naročito kao raka, stvaraju svoj potisak »odupiranjem« mlaza gase u okolini vazduha. Spoljni vazduh ne pomaže ni na koji način u stvaranju potiska. On deluje samo kao kočnica preko aerodinamičkog otpora i ometa isticanje mlaza.

Ukupni potisak u raketnom motoru je zbir dva potiska. Prvi potisak je nastao promenom količine kretanja ističućeg gase, a on se izračunava kao proizvod iz protoka mase pogonskih materija i brzine isticanja (relativne u odnosu na raketu).

Drugi potisak je proizvod izlaznog preseka mlaznika i razlike između pritiska na izlaznom preseku i onog u atmosferi. Prema tome, osnovni obrazac za potisak raketnog motora je:

$$T = \frac{w}{g} v_e - (P_e - P_a) A_e \quad \dots \dots \dots \quad (11)$$

gde su:

T — potisak,

w — težinski protok pogonskih materija,

g — ubrzanje teže,

v_e — izlazna brzina gasova,

P_e — pritisak gasova na izlazu,

P_a — atmosferski pritisak,

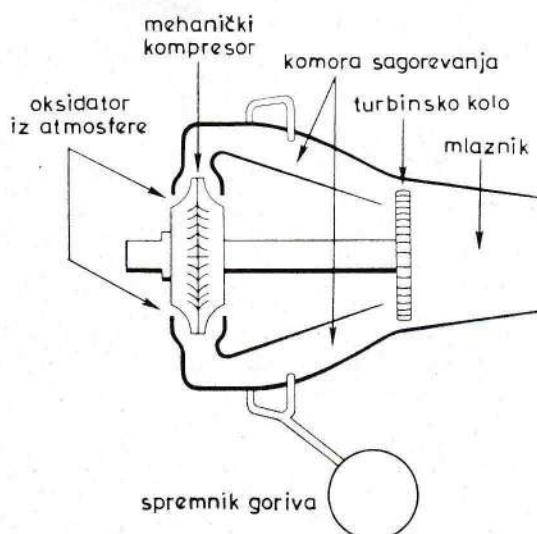
A_e — izlazni presek mlaznika.

Kada je atmosferski pritisak ravan onom u izlaznom preseku, deo potiska proizveden razlikom pritiska ravan je nuli, te je:

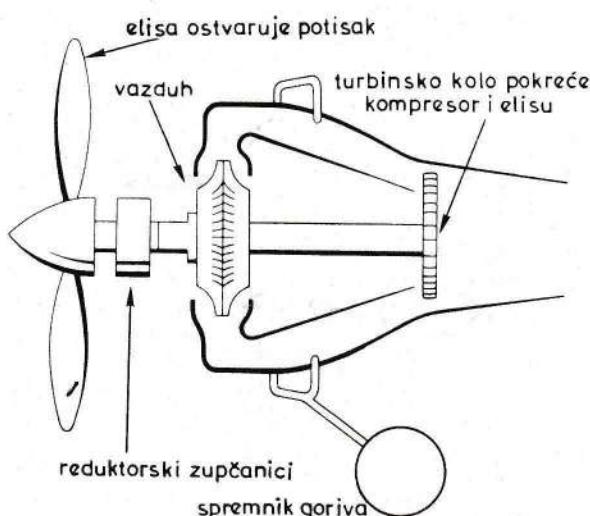
$$T = \frac{w}{g} v_e \quad \dots \dots \dots \quad (12)$$



Sl. 51 — Raketa nosi sobom gorivo i oksidator (nezavisna od atmosfere)



Sl. 52 — Turbomlazni motor (zavisan od atmosfere)



Sl. 53 — Turbomlazni motor (zavisan od atmosfere)

Pod ovakvim uslovima dobija se maksimalni potisak za date pogonske materije i pritisak u komori sagorevanja. Za motor u kome se gasoviti proizvodi sagorevanja šire do pritiska spoljne atmosfere kaže se da ima optimalni stepen širenja (ekspanzije).

Pošto se promenom atmosferskog pritiska menjaju drugi član u jednačini za potisak (jednačina 11), to se može očekivati da će se potisak menjati sa visinom. Promenom visine može se promeniti potisak za 10 do 30%. Prema tome, mogu se izvući sledeći zaključci:

1. Povećanje spoljnog pritiska smanjuje potisak.
 2. Raketni motor će raditi najekonomičnije u vakumu gde je pritisak (P_a) ravan nuli.
- Pošto su razmotreni fizički principi raketnih motora, potrebno ih je podeliti prema tipu.

PODELA MLAZNIH MOTORA

Glavna pažnja pri ovoj podeli biće posvećena dvema vrstama: raketnim i protočnomlaznim motorima.

RAKETNI MOTORI

Rakete karakteriše to da sve što im je potrebno za pogon nose u sebi, što se vidi na slici 51. Pogonske materije su im gorivo i oksidator. Oksidator je materija koja sadrži kiseonik potreban za sagorevanje goriva; prema tome, rad rakete ne zavisi od atmosfere.

PROTOČNOMLAZNI MOTORI

U protočnomlaznom motoru vazduh kroz koji letelica prolazi se usisava u motor i ubrzava posredstvom toplotnog procesa, da bi se izbacio povećanom brzinom. Jedan takav tip motora je turbomlazni, kome se vazduh sabija posredstvom rotacionog kompresora, da bi se zatim zagrejao u komori sagorevanja i izbacio kroz mlaznik. Kompresor dobija pogon od turbine sa kojom se nalazi na istoj osovini.

Na slikama 52 i 53 može se zapaziti da u turbomlaznom i turboelisnom motoru turbina dobija energiju za obrtanje od toplih gasova koji izlaze iz komore sagorevanja.

Jedan drugi tip protočnomlaznog motora je nabojnomlazni motor. Kod njega se vazduh sabija u uvodniku, posredstvom tzv. nabojnog ili zaustavljućeg efekta. I u ovom motoru se vazduh zagreva sagorevanjem goriva, čime mu se povećava brzina potrebna za stvaranje izduvanih mlaza. Slika 54 prikazuje ovaj tip motora.

Postoji još jedan motor protočnomlazne vrste — tzv. pulzirajućemlazni motor. Ovaj motor se razlikuje od prva dva, jer radni proces u njemu nije kontinualan nego isprekidan — nainzmeničan.

Njegovi elementi se mogu videti iz slike 55.

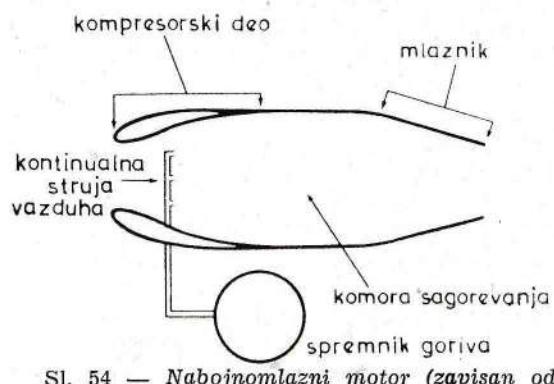
Pošto su objašnjene osnovne vrste pogona, treba se upoznati sa vrstama pogonskih materijala koje ti pogoni koriste.

POGONSKE MATERIJE MLAZNIH MOTORA

Rečeno je da potisak nastaje kao posledica utroška energije u mlaznom motoru. U izvensnim materijama se nalazi nagomilana velika količina energije. Kada takve materije međusobno reaguju u mlaznom motoru, one oslobođaju energiju za stvaranje potiska radi pogona. To su goriva, a zajedno sa oksidatorom, sa kojim se spajaju, nazivaju se pogonskim materijama. Hemijskom reakcijom goriva i oksidatora u komori za sagorevanje oslobođa se velika količina gasa visokog pritiska i temperature. Na takav način stvorena topotna energija pretvara se u kinetičku energiju u mlazniku.

Kada se zna da jedan motor može da ostvari let brži od artiljerijske granate, da radi u bezvazdušnom prostoru, da razvije više snage nego klipni motor, a sve to da čini sa malo pokretnih delova, čovek je sklon da veruje da za sve to ima da se zahvali nekoj složenoj hemijskoj pogonskoj materiji. Ali to nije tačno. Mlazni motori rade sa običnim i jevtinim gorivom kao što su kerozin, benzin, alkohol, crni barut i ugljena prašina. Dobar rezultat zavisi pak od pravilnog izbora kombinacije gorivo-oksidator, u smislu sposobnosti razvijanja energije i pogodnosti upotrebe.

S obzirom na fizičko stanje, pogonske materije mogu biti čvrste, tečne, gasovite ili u kombinaciji nekog od ovih stanja. Najčešće su po-



Sl. 54 — Nabojnomlazni motor (zavisan od atmosfere)

gonske materije ili čvrste, ili tečne, ili gasovite, a retko se javljaju u kombinacijama. Gasovi se retko upotrebljavaju. Razlog tome je da se više energije može izvući transformacijom tečne ili čvrste pogonske materije u gasovitu nego kada se motor vodi gasovitom pogonskom materijom.

NEKE VELIČINE VEZANE ZA POGONSKE MATERIJE

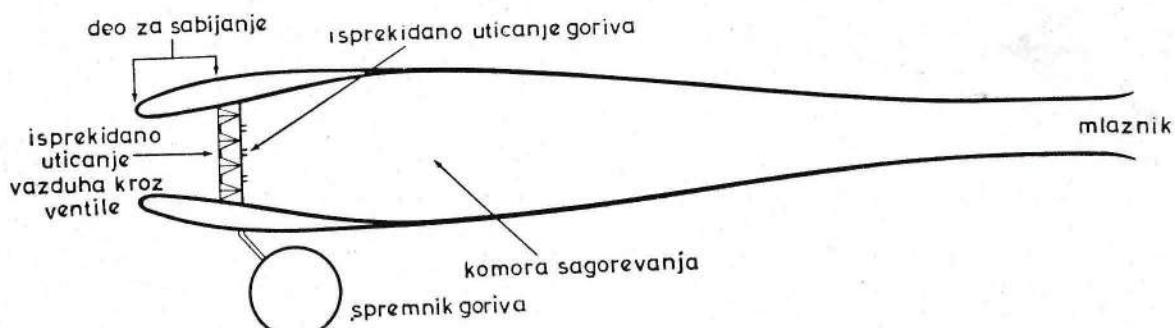
Neophodno je imati metod za međusobno upoređivanje pogonskih materija, kako bi se ispitale pogonske osobine tih materija.

Poređenje se obično čini određivanjem »totalnog impulsa«. Taj impuls je definisan kao proizvod potiska u kilogramima i vremena gojenja u sekundama. U obliku obrasca to izgleda:

$$(totalni impuls) = (potisak) \times t \text{ (vreme)} \\ \text{u kg} \text{ s} \qquad \qquad \qquad \text{u kg} \text{ s}$$

Čvrste pogonske materije se upoređuju na bazi »specifičnog impulsa«, koji se definiše kao impuls po jednom kilogramu pogonske materije. To bi se moglo napisati kao:

$$(specifični impuls) = \frac{\text{totalni impuls (u kg s)}}{W \text{ (težina pog. mater. u kg.)}}$$



Sl. 55 — Pulzirajućemlazni motor (zavisan od atmosfere)

Uobičajen način međusobnog upoređivanja tečnih pogonskih materija je upoređivanje na bazi »specifičnog potiska«. Specifični potisak je ekvivalent specifičnom impulsu kod čvrstih pogonskih materija, ali se određuje na nešto drugačiji način. On se definiše kao potisak u kilogramima koji se ostvaruje potrošnjom tečne pogonske materije od jednog kilograma u sekundi. Prema tome:

$$(\text{specifični potisak}) = \frac{(\text{potisak u kg})}{u \text{ kg/kg/s}} = \frac{W (\text{težinski protok kg/s})}{}$$

Specifični potisak se obično izražava u sekundama.

Često se može sresti upotreba specifičnog impulsa za tečne kao i za čvrste pogonske materije, mada je u prvom slučaju opravdanija. Isto tako, ne bi bilo praktično da se meri sekundni težinski protok čvrstih pogonskih materija, te je specifični impuls bolji kao sredstvo za poređenje.

»Spec. potrošnja pogonskih materija« je druga veličina važna u sistemima tečnih pogonskih materija. Ona je recipročna vrednosti specifičnog potiska. Definisana je kao protok pogonskih materija u kilogramima u sekundi, potreban za postizanje jednog kilograma potiska. Dakle,

$$\text{Specifična potrošnja} = \frac{\text{težinski protok}}{\text{potisak}}$$

Ostale veličine koje treba znati su »odnos mešavine« i »brzina isticanja«.

»Odnos mešavine« pokazuje relativni odnos oksidatora i goriva, upotrebљenih u dатој комбинaciji. Brojno je jednak količniku težišnog protoka oksidatora i goriva. »Brzina isticanja« se određuje teoretskim putem na bazi energetskog sadržaja kombinacije pogonskih materija.

Stvarna brzina isticanja je manja od teoretske, pošto nijedan motor ne može da potpuno pretvoriti energiju pogonskih materija u kinetičku energiju mlaza. Tako, »efektivna brzina isticanja« se poneki put upotrebljava i određuje na bazi potiska i potrošnje pogonskih materija.

$$\text{Efektivna brzina isticanja} = \frac{\text{potisak}}{\text{protok mase}}$$

CVRSTE POGONSKE MATERIJE

Uopšte, čvrste pogonske materije se sastoje od goriva, obično nekog ugljovodonika, i oksidatora koji sadrži veliki procenat kiseonika. Ove su materije pomešane, tako da stvaraju jednu čvrstu masu željenih hemijskih i fizičkih

karakteristika. Završni proizvod se naziva »šipka«. Jedna šipka ili više njih čine »punjenje«.

Idealna čvrsta pogonska materija bi trebalo da ima sledeće karakteristike:

1. Proizvedena iz supstanci koje se lako dobijaju,
2. Sigurna i laka za rukovanje,
3. Laka za uskladištenje — otporna na udar i promene temperature,
4. Pali se i gori ravnomerno,
5. Održava konstantnu površinu gorenja,
6. Nehigroskopna (ne apsorbuje vodenu paru),
7. Bezdimna,
8. Bez plamena.

Međutim, teško da ma koja pogonska materija posede sve pomenute karakteristike. Neki od ovih karakteristika dobijaju se na račun drugih, zavisno od željenih performansi.

Podela čvrstih pogonskih materija. U osnovi, čvrsta pogonska punjenja mogu biti podeljena u jednu od dve grupe: sa ograničenim gorenjem i neograničenim gorenjem. Pogonsko punjenje sa ograničenim gorenjem ima neke od svojih površina pokrivene inhibitorom. Zahvaljujući tome može se kontrolisati sagorevanje, tj. ograničavati ga samo na željene površine. Na taj način se produžava trajanje sagorevanja i određuje pritisak u komori sagorevanja. »Goruća cigareta« je dobar primer za ograničeno sagorevanje, ako se deo pokriven hartijom zamislji kao inhibirana površina.

Punjjenje sa neograničenim gorenjem sagoreva po svim površinama jednovremeno. Prema tome, takvo punjenje daje veliki potisak u kratkom vremenu, dok punjenje sa ograničenim gorenjem ima manji potisak za duže vreme.

Gorenje čvrste pogonske materije zavisi od njene hemijske kompozicije, njene početne temperaturе, temperature u komori sagorevanja, brzine gorenja na površini sagorevanja, pritisaka u komori sagorevanja, kao i veličine i oblike punjenja. Neko pogonsko punjenje može da gori na takav način da površina sagorevanja ostaje konstantna, dajući konstantan potisak. Ovaj tip sagorevanja je poznat kao »neutralno sagorevanje«. Drugo punjenje može da povećava površinu sagorevanja tokom napredovanja sagorevanja. To je slučaj pri tzv. »progresivnom sagorevanju«. Isto tako, neko punjenje može da smanjuje površinu sagorevanja tokom gorenja. To je tzv. »degresivno sagorevanje«.

Brzina sagorevanja čvrste pogonske materije određuje se njenom potrošnjom. Brzina sagorevanja meri se smanjenjem dužine pu-

njenja u jedinici vremena, u milimetrima u sekundi, po pravcu normalnom na površinu sagorevanja.

Oblici punjenja. Kao što je napred rečeno, potisak zavisi od protoka mase i promene brzine radnog fluida. Za veliki potisak potrebna je velika površina sagorevanja, kako bi se dobio veliki protok mase. Manja površina daje manji protok mase i manji potisak. Prema tome, promenom geometrijskog oblika punjenja može se uticati na promenu potiska za datu količinu pogonske materije u nekoj komori sagorevanja.

Na slici 56 pokazani su neki oblici punjenja koji su u upotrebi. Gornja slika pokazuje punjenje sa ograničenim sagorevanjem. To je jedan valjak koji potpuno ispunjava komoru sagorevanja i sagoreva samo po prednjoj čeonoj površini. Ovakvo punjenje se zove »punjenje cigaretnog tipa«. Potisak je srazmeran poprečnom preseku, dok trajanje sagorevanja zavisi od dužine punjenja.

Druga slika pokazuje punjenje sa »neograničenim sagorevanjem«. Takvo punjenje je obično šuplje i gori u isto vreme i na spoljnoj i unutrašnjoj strani. Potisak je takođe srazmeran površini gorenja. Međutim, pošto se unutrašnja površina povećava dok se spoljna smanjuje, moguće je održavati približno konstantnu površinu gorenja. Trajanje gorenja šupljeg punjenja zavisi od debeline zida. Ovaj tip punjenja je poznat kao »neograničeno šuplje cilindrično punjenje«.

Nedostaci čvrste pogonske materije. U nedostatke čvrstih pogonskih materija ubraja se osjetljivost punjenja na temperaturu. Početna temperatura punjenja znatno utiče na njegove performanse. Jedno te isto punjenje će dati veći potisak u topлом danu nego u hladnom. Punjenje konstruisano da proizvede 1000 kg potiska na 40°C može dati samo 600 kg potiska na 15°C. Početna temperatura takođe utiče na brzinu sagorevanja. Ova karakteristika punjenja zahteva da se ono skladišti na određenoj temperaturi do momenta upotrebe. Procentualna promena potiska po stepenu Celzijusovom naziva se temperaturnom osjetljivošću date pogonske materije.

Temperatura takođe utiče na fizičko stanje čvrste pogonske materije. Na krajnje niskim temperaturama neke pogonske materije postaju krite i podložne su lomljenju. Pukotine u punjenju povećavaju površinu gorenja, a time i pritisak u komori sagorevanja. Ako taj pritisak pređe veličinu za koju je komora konstruisana, može doći do loma ili eksplozije. Pogonska materija koja je izložena visokoj temperaturi prepaljenja, može se deformisati postajući meka i slaba. Ovo takođe dovodi do pogoršanja per-

formansi. Radni opseg temperature za najčešće upotrebljavane pogonske materije je obično između 10 i 60°C.

Pritisak takođe igra važnu ulogu u performansama čvrste pogonske materije. Ispod jednog određenog pritiska u komori sagorevanja, gorjenje postaje krajnje nestabilno. Neke pogonske materije nisu u stanju da održe sagorevanje pri normalnom atmosferskom pritisku. Obično je za čvrste pogonske materije pritisak u komori relativno visok. Za dati sastav pogonske materije i površine sagorevanja, pritisak u komori je određen presekom grla mlaznice. Ako je presek grla prevelik, ne može se održati potreban pritisak u komori, te nastaje nestabilno sagorevanje.

Slabosti čvrstih pogonskih materija su takođe higroskopnost i sklonost ka dekompoziciji, ali se one mogu ublažiti dodavanjem nekih hemikalija osnovnoj bazi pogonske materije. Takve hemikalije se nazivaju »dopune« (aditivi).

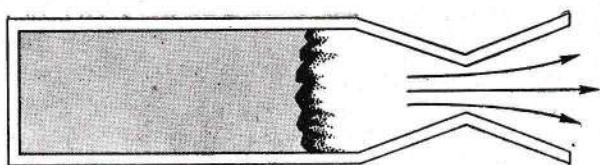
Karakteristične pogonske materije. Pogonske materije koje se najčešće sreću predmet su daljeg izlaganja. Hemiske formule su date za neke od njih sa ciljem da se obrati pažnja na sadržaj ugljenika i vodonika u gorivu, kao i na visok sadržaj kiseonika u oksidatoru.

Crni barut. Jedan od prvih oblika čvrstih pogonskih punjenja bio je načinjen od crnog baruta. Približni procentualni sastav bi bio:

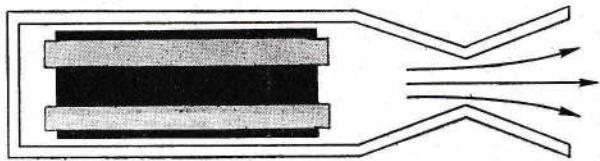
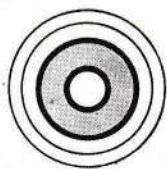
Kalijum-nitrat (KNO_3) (šalitra)	61,6%
Drveni ugalj (C)	23 %
Sumpor (S)	15,4%

Drveni ugalj i sumpor reaguju sa kiseonikom. Šalitra kao što se vidi iz formule, sadrži taj kiseonik. Ovi su sastoјci među sobom dobro izmešani, zahvaljujući dodavanju neke materije koja služi kao vezivo, npr. tutkala ili ulja.

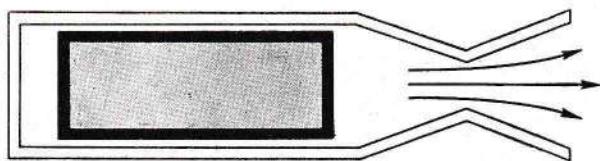
Kada se posredstvom nekog upaljača dovede toplota šalitra počinje da odaje kiseonik. Kiseonik se spaja sa sumporom proizvodeći pri tome veliku toplotu i veliku količinu ugljen-dioksida i sumpor-dioksida. Ovi gasovi čine veći deo mase izduvnih gasova. Toplota proizvedena ponutom reakcijom daje tim gasovima veliku brzinu. Crni barut ima specifični impuls otprikljike oko 65 kgs/kg. On ne spada u tzv. snažne pogonske materije. Slabe strane su mu da je osjetljiv na temperaturu i da je sklon lomljenju. Njegova brzina isticanja je relativno mala i varira od 450 do 750 m/s. On se obično upotrebljava u signalnim raketama i kao pripala za druge pogonske materije.



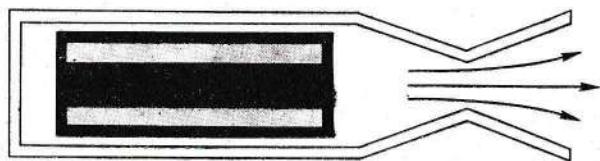
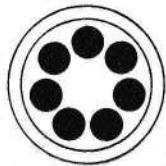
ograničeno krajnje gorjenje



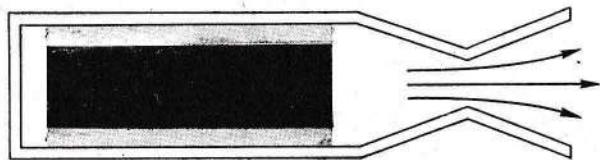
neograničeno šupalj cilindar



neograničeno krstasto



neograničeno višestruko punjenje



ograničeno zvezdasto

Sl. 56 — Oblici čvrstih punjenja

Balistit. To je dvobazna pogonska materija, koja je sastavljena od dve osnovne materije: nitroceluloze i nitroglicerina. Balistit takođe sadrži manje količine dopune; zahvaljujući kojima postiže odgovarajuće dejstvo. »Stabilizator« apsorbuje gasovite proizvode spore dekompozicije i smanjuje tendenciju apsorpcije vlage za vreme uskladištenja. »Plastizator« služi kao vezivno sredstvo. »Zatamnjivač« se dodaje da bi se apsorbovala toplota reakcije i sprečila brza toplota dekompozicije nesagorelog dela punjenja. »Smanjivač plamena« hlađi izduvne gasove pre nego što oni izadu u atmosferu, sprečavajući time dogorevanje u vazduhu. Tipična kompozicija balista je sledeća:

Komponenta	Procentualni sadržaj
Nitroceluloza $C_{24} H_{40} O_{20}$ (NO_3) ₃	51,38% pogonska materija
Nitroglycerin $C_3 H_5 (NO_3)_3$	43,38% pogonska materija
Dietil-ftalat	1,09% plastifikator
Kalijum-nitrat	1,45% smanjivač
Difenil-amin	0,07% stabilizator
Nigrosinska boja	0,10%

Balistit ima specifični impuls otprilike 210 kgs/kg, a svojstveno mu je da ima bezdimni mlaz. Pošto on tokom vremena naginje dekompoziciji, poželjno je da mu temperatura uskladištenja iznosi između 20 i 60°C. Komponente balistita su podložne detonaciji i toksične su kada dođu u dodir sa kožom. Proizvodni proces je težak i opasan.

Galcit. Čvrsta pogonska materija proizvedena u Jet Propulsion Laboratory u okviru Guggenheim Aeronautical Laboratory Kalifornijskog tehnološkog instituta nazvana je Galcit (početna slova naziva pomenute laboratorije). Galcit se po težini sastoji od oko 25% mešavine asfaltulje, koja služi kao gorivo i vezivo, i 75% kalijum-perhlorata ($KClO_4$) koji služi kao oksidator. Galcit na običnoj temperaturi sličan je tvrdom asfaltu za popločavanje ulica.

Preporučljiv temperaturni opseg za njegovo korišćenje je između 20 i 50°C. Njegov specifični impuls je oko 186 kg/s/kg, dok mu je proizvodni proces relativno jednostavan. Opseg temperatura za uskladištenje je —23°C do 50°C. Prema tome, on je prilično stabilan na raznim temperaturama; ne apsorbuje vlagu. Glavni nedostatak Galcita je da njegovi izduvni gasovi proizvode gusti oblak belog dima.

Pogonska materija NDRC. Ovu pogonsku materiju razvio je National Defense Research Committee. Tipični sastav je: otprilike podjednak deo amonijum-nitrata i natrijum-nitrata (46,5% svaki) i 7% smole kao veziva (obično

ureo-formaldehid). Ova pogonska materija je poznata po svojoj termičkoj stabilnosti, ali i po tome da natrijum-nitrat apsorbuje vlagu iz atmosfere, usled čega dolazi do slabljenja i omekšanja punjenja. Zbog toga on mora biti hermetički zatvoren za vreme uskladištenja. Izduvni gasovi su u obliku gustog dima.

Međusobno poređenje čvrstih pogonskih materija. Tablica niže daje uopšteno poređenje poslednje tri razmatrane pogonske materije.

TEČNE POGONSKE MATERIJE

Suprotno čvrstim pogonskim materijama koje su smeštene u komori sagorevanja rakete, tečne pogonske materije su smeštene u spremnicima, odakle se vode i ubrizgavaju u komoru sagorevanja. Njihovom upotrebom je moguće ostvariti duže sagorevanje i višekratno paljenje. Sagorevanje se može zaustaviti i ponovo aktivirati u željenim intervalima, regulisanjem protoka pogonskih materija.

Kao oksidator se upotrebljavaju materije bogate kiseonikom, dok je gorivo tečnost bogata ugljenikom i vodonikom. Primer za gorivo može biti alkohol (C_2H_5OH) i anilin ($C_6H_5NH_2$).

	Balistit	NDRC Komposit	Galcit
Specifični impuls (kgs/kg)	210	160	186
Brzina isticanja (m/s)	2040	1540	1770
Specifična težina (kg/m³)	1600	1600	1740
Osetljivost na temperaturu	visoka	srednja	srednja
Temperaturne granice (°C)	ograničene velikom temperaturnom osetljivošću	—40 do +48	—23 do +50
Brzina sagorevanja (cm/s)	3,6	0,64	4,0
Temperatura sagorevanja (°C)	2800—3300	1700—2000	1700—2000

Čak dodatak gorivu i oksidatoru može se koristiti neki katalizator kojim se povećava brzina reakcije. Poneki put se upotrebljavaju neke dodatne interne materije koje ne uzimaju učešća u hemijskoj reakciji, ali povećavaju potisak povećanjem mase pogonskih materija. Mnoge tečne pogonske materije su bile eksperimentalno ispitane, ali kao i za čvrste, nije nađena kombinacija koja poseduje sve željene karakteristike. Od pogonskih materija bi se želelo:

a. da se mogu lako nabaviti sirovine i jednostavno fabrikovati;

b. da je velika količina toplove sagorevanja po jedinici težine, kako bi se postigle visoke temperature u komori sagorevanja,

c. da je mala molekularna težina gasovitih proizvoda reakcije. Uopšte, pogonske materije koje imaju veliki procentualni udio vodonika najbolje će ispunjavati zahteve navedene pod b i c, jer razvijaju više toplove po jedinici težine vodonika nego što bi to bio slučaj sa ugljenikom. Proizvodi reakcije koji sadrže vodonik imaju manju molekularnu težinu nego oni koji sadrže ugljenik;

d. da imaju nisku temperaturu mržnjenja koja dozvoljava širok dijapazon primene;

e. da im je specifična težina velika, kako bi se omogućio smeštaj velike težine pogonskih materija u određenoj zapremini i time smanjila veličina i težina rakete, kao posledica manjih i tanjih spremnika;

f. da imaju nisku toksičnost i korozivnost;

g. da im je nizak pritisak pare i da ne postoji tendencija raspadanja, jer se time uprošćuje problem skladištenja.

Podela tečnih pogonskih materija. Tečne pogonske materije mogu biti svrstane u grupu jednorodnih ili dvorodnih pogonskih materija. Jednorodne pogonske materije su kombinovane od goriva i oksidatora koji se nalaze u jednoj jedinoj hemikaliji. To je slučaj npr. sa mešavinom vodonik-peroksida (H_2O_2) i etil-alkohola (C_2H_5OH), ili nitro-metana (CH_3NO_2) samog. Jednorodne pogonske materije su stabilne na normalnoj temperaturi i pritisku. Međutim, ako se aktiviraju nekim sistemom paljenja, one se raspadaju oslobadajući tople gasovite proizvode sagorevanja. Jednorodne pogonske materije se ne upotrebljavaju često, s obzirom na to da nisu pouzdane jer nagnju eksploziji. U izvesnim slučajevima detonacija može nastati u cevovodima, a može se proširiti nazad do spremnika. U dvorodnim pogonskim materijama, gorivo i oksidator su fizički odvojeni sve do momenta kada se ubrizgavaju u komoru sagorevanja. Sagorevanje se

odvija u uslovima visoke temperature i pritiska, što ima za posledicu proizvode sagorevanja velike kinetičke energije. Najčešće upotrebljavane pogonske materije su dvorodne.

Od velikog broja goriva i oksidatora koji su bili ispitivani radi korišćenja u raketama, neki će biti opisani.

Tečna goriva. Anilin, hidrazin - hidrat i etil-alkohol su tri tečna goriva koja se najčešće upotrebljavaju.

Tehnički anilin ($C_6H_5NH_2$) je tečnost slična po providnosti ulju, specifične težine 1,02, dokle nešto teže nego voda. Tačka ključanja iznosi oko $184^{\circ}C$, a tačka mržnjenja oko -6° . Anilin se relativno lako dobija zato što su ranije razvijeni proizvodni procesi zbog njegove široke industrijske potražnje u tehnici boja i rastvarača. Anilin se proizvodi nitracijom i redukcijom benzina. U neposrednom kontaktu sa crvenom pušećom azotnom kiselinom on se pali spontano. Gorivo i oksidator koji na takav način reaguju nazivaju se »hipergolima«. Ova kombinacija je uspešno upotrebljena u raketni WAC »korporal«.

Relativno visoka tačka mržnjenja anilina može se sniziti dodavanjem do 20% furfural-alkohola, a da se pri tom ne smanjuju performanse. Anilin je nekorozivan, otporan na udar i gori slično kerozenu. Treba ga čuvati od sunčeve svetlosti, jer se tako sprečava da se ne raspadne. Anilinom valja pažljivo rukovati, pošto može da prouzrokuje opasne toksične efekte u kontaktu sa kožom ili udisanjem pare.

Hidrazin-hidrat ($N_2H_4H_2O$) je tečnost bez boje, nešto teža od vode. Tačka ključanja mu je oko $117^{\circ}C$, a tačka mržnjenja $-40^{\circ}C$, mirisa sličnog amonijaku. Ova materija stvara dim u kontaktu sa vazduhom i eksplozivna je u koncentraciji iznad 25%. Hidrazin-hidrat daje hipergolsku reakciju sa vodonik-peroksidom, a koristili su ga Nemci kao komponentu pogonskih materija za lovački avion ME 109.

Para ovog goriva intenzivno nadražuje oči, nos, grlo i kožu. Oštećeju obične metale, a suprotstavljuju mu se nerđajući čelici i staklo.

Etil-alkohol (C_2H_5OH) je svetla tečnost, lakša od vode, tačke ključanja oko 79° i tačke mržnjenja $-117^{\circ}C$. Otporan je na udar i promene temperature. Lako se dobija zbog njegove široke upotrebe u hemijskoj industriji i industriji likera. Alkohol se obično ne smatra toksičnim, osim ako se uzima u velikim količinama. Ovo gorivo u kombinaciji sa tečnim kiseonikom je upotrebljavano u nemačkoj A-4 (V-2) raketni.

Tečni oksidatori. Opisaćemo tečan kiseonik i jednu vrstu azotne kiseline, jer su to najčešće upotrebljavani oksidatori.

Pogonska materija (oksidator i gorivo)	Odnos mešavine (oks/gor.)	Pritisak u komori (kg/cm ²)	Temperatura sagorevanja (°C)	Izlazna brzina (m/s)	Specif. potisak (s)
Tečan kiseonik i tečan vodonik	5.33	23.8	3000	3240	335
Tečan kiseonik i hidrazin	0.50	21.0	2480	2500	259
Tečan kiseonik i amonijak	1.40	21.0	2720	2460	255
Tečan kiseonik i stoprocentni etil-alkohol	1.50	21.0	2900	2340	243
Tečan kiseonik i benzin	3.00	21.0	3020	2340	242
Tečan kiseonik i 75% etil-al- kohol, 25% vode	1.3	21.0	2800	2310	239
Gasoviti kiseonik i nitro-metan	0.05	19.0	2480	2190	227
Crvena puščana azotna kiselina i anilin	3.0	21.0	2770	2120	221
Nitro-metan	—	21.0	2170	2100	218
Bela pušeća azotna kiselina i furfural-alkohol	1.9	21.0	2770	2070	214
Vodonik-peroksid 87%-tni plus voda	—	21.0	710	1210	126

Tečan kiseonik (O_2) se proizvodi pretvaranjem vazduha u tečnost i isparavanjem azota i drugih gasova. Ova plavičasta tečnost ima tačku ključanja oko $-183^{\circ}C$, a tačku mržnjenja oko $-220^{\circ}C$. Teža je od vode (specifična težina joj iznosi 1,14). Zbog ovako niske tačke ključanja, isparavanje je intenzivno. Iz tog razloga sklađištenje i transport do mesta lansiranja postaje problem jer su u pitanju znatni gubici. Kada se tečan kiseonik sipa na metal koji se nalazi na normalnoj temperaturi, nastaje reakcija slična onoj kada voda kaplje na usijanu peć. Gubici od isparavanja kod V-2 rakete su iznosili oko 2,2 kg za svaki minut koji je protekao između momenta punjenja i momenta ispaljivanja raket.

Krajnje niska temperatura mržnjenja tečnog kiseonika čini da se vodena para iz okolne atmosfere skuplja i smrzava na cevovodima i ventilima. Tečan kiseonik je nekorozivan i netoksičan, ali u dodiru sa kožom može da pro-

uzrokuje opasne rane. Izraz »rana« je upotrebljen u istom značenju kao kada se govori o rani tj. »opekotini« od suvog leda.

Azotna kiselina (HNO_3) upotrebljava se kao oskulator u nekoliko oblika. Jedan od oblika je »mešana kiselina« koja sadrži koncentrisanu azotnu kiselinu (HNO_3) i manju količinu sumorne kiseline (H_2SO_4).

Bela pušeća azotna kiselina se sastoji od koncentrisane azotne kiseline i oko 2% vode.

Najčešće upotrebljavana i energetski koncentrisanija je tzv. crvena pušeća azotna kiselina (CPAK), koja se sastoji od koncentrisane azotne kiseline u kojoj je rastvoren azot-dioksid (NO_2). Ista varira u boji od narandžaste do crvene, kao cigla a dobila je svoje ime od dima azotnog oksida crvene boje. Ona se lako dobija pošto se upotrebljava u velikim količinama pri proizvodnji eksploziva i đubriva. CPAK je vanredno korozivna tako da se samo nerđajući čelik upotrebljava za pravljenje spremnika i cevo-

voda. Visoki pritisak para stvara problem usklađenja i transporta. Dim je veoma otrovan, dok opasne opekomine nastaju tek prilikom kontakta između kože i tečnosti. Ovaj oksidator je bio uspešno upotrebljavan sa anilinom, dajući oko 63,5 svoga kiseonika za sagorevanje.

Jednorodne pogonske materije. Nitro-metan je jednorodna pogonska materija koja je ograničeno upotrebljavana. Sastav mu je CH_3NO_2 , bez boje, sa temperaturom ključanja od oko 100°C , tačka mržnjenja oko -7°C . Njegova upotreba kao pogonske materije ograničena je zbog svojstvene mu tendencije da prenosi detonaciju kroz cevovode i spremnik, pod izvesnim uslovima temperature i pritiska. On najbolje reaguje pod visokim pritiscima. Obično se pali dodavanjem male količine gasovitog kiseonika, kao i paljenjem posredstvom električne varnice. Nitro-metan nije korozivan sa mnogim metalima i minimalno je toksičan.

Vodonik-peroksid (H_2O_2) je bezbojna tečnost. Tačka mržnjenja mu je oko -10°C i tačka isparavanja oko 140°C pri koncentraciji od oko 87%. U apotekama se prodaje u koncentraciji od oko 3%, dok se u mlaznim motorima koristi u koncentraciji od 70 do 90%.

U kontaktu sa nekim katalizatorima, kao klijijum-permanganatom i natrijum-permanganatom, on se razlaže stvarajući vodenu paru i gasovit kiseonik. Kada se 90%-tni peroksid razlaže, oko 42% od ukupne težine je gasovit kiseonik. On se upotrebljava kao oksidator u kombinaciji sa alkoholom i hidrazin-hidratom.

Treća upotreba ove materije je pomoćni pogon, u kom slučaju se gasoviti produkti razlaganja koriste za pogon turbine koja pokreće pumpe za gorivo i oksidator vezane za osovinu turbine.

Spremnići za vodonik-peroksid se prave od legura aluminijuma, nerđajućeg čelika i nekih plastičnih materija. Koncentracija mu opada za samo 1 — 3% kada je usklađen na umerenim temperaturama.

Koncentrisani vodonik-peroksid stvara opekomine na koži:

Poređenje tečnih pogonskih materija. U sledećoj tablici upoređeno je nekoliko tečnih pogonskih materija. Specifični potisak i izlazna brzina su sračunati pod pretpostavkom da se gas širi do pritiska od jedne atmosfere.

Treba imati na umu da ne postoji pogonska materija koja bi se mogla smatrati najboljom za pogon rakete. U stvari, namena rakete diktira izbor pogonske materije.

OSNOVNE KOMPONENTE MLAZNIH MOTORA

Osnovne komponente svakog mlaznog motora su komora sagorevanja i izduvni mlaznik.

KOMORA SAGOREVANJA MLAZNIH MOTORA

Komora sagorevanja je prostor u kome se potencijalna energija transformiše u kinetičku. Najčešće se izrađuje u jednostavnim oblicima kao što su npr. cilindar i sfera. Dužina i prečnik joj moraju biti takvi da stvaraju onoliku zapreminu kolika je potrebna za potpuno i stabilno sagorevanje. Dužina komore i prečnik grla mlaznika su određeni karakteristikama upotrebljenih pogonskih materija. Komora sagorevanja i mlaznik moraju biti tako konstruisani da ostvaruju predviđenu brzinu isticanja i pritisak na izlazu iz mlaznika. Već u zavisnosti od upotrebljene pogonske materije, komora sagorevanja može, takođe, da sadrži sistem za ubrizgavanje i sistem za paljenje. Razni tipovi ovih sistema će se objasniti u nastavku.

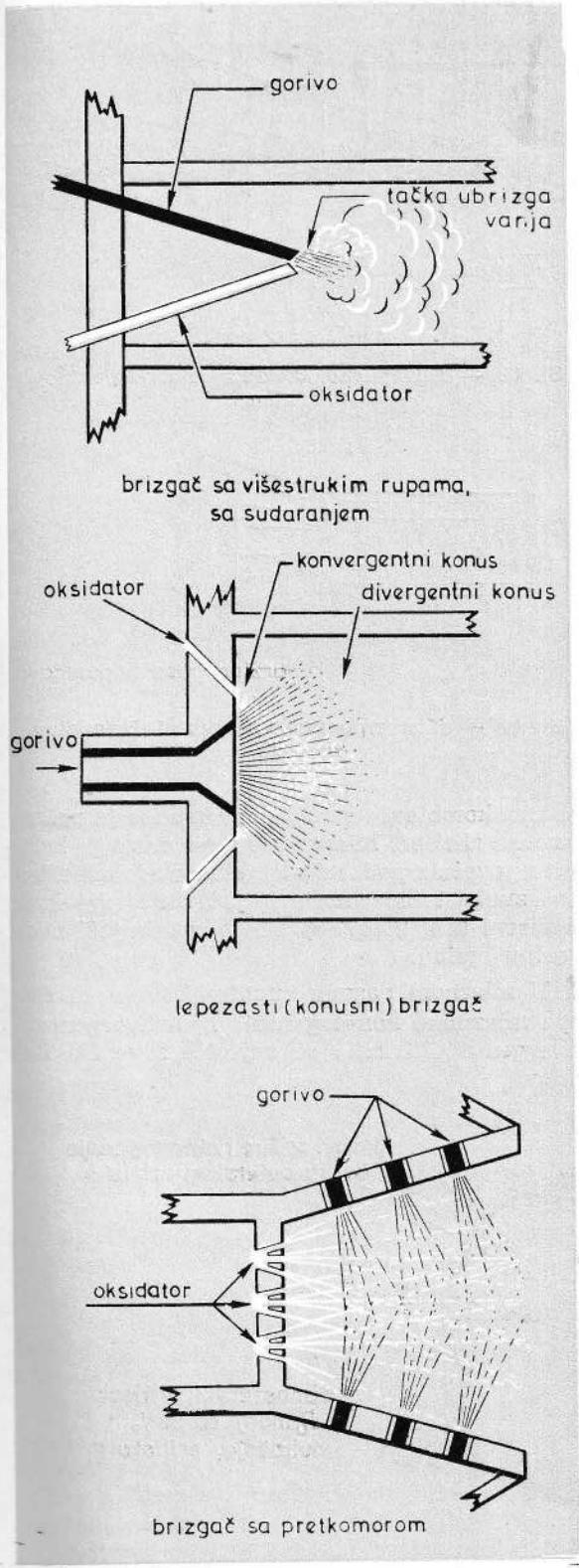
Brizgači. Funkcija brizgača je slična funkciji karburatora u motorima sa unutrašnjim sagorevanjem. On raspršuje i meša pogonske materije tako da se ostvaruje pravilan odnos gorivo-oksidator u mešavini.

Kod brizgača prikazanog na gornjoj skici slike 57, gorivo i oksidator se ubrizgovaju kroz veliki broj rupica i to na taj način što se fino stvoreni mlazevi goriva i oksidatora međusobno sudaraju u predviđenim tačkama. Rezultat toga je stvaranje fine magle kapljica.

Na sledećoj skici predstavljen je brizgač u koji se gorivo i oksidator ubrizgovaju kroz rupice na dva koncentrična kruga. Rezultat toga su dva konusa, ili cilindra, goriva i oksidatora koji se međusobno seku, raspršujući na taj način tečnosti.

Na zadnjoj skici je prikazan brizgač koji je upotrebljen u raketni V-2. Gorivo i oksidator se ne raspršuju sudaranjem nego mešanjem usled turbulentije i usled stvaranja pare. U pomenu-toj raketni fine kapljice alkohola su se mešale sa gasovitim kiseonikom.

Sistemi paljenja. Da bi se aktiviralo sagorevanje goriva i oksidatora koji se ne pale međusobno spontano, za paljenje je potrebno dovesti energiju spolja. Ovu energiju daje odgovarajući sistem paljenja. Upaljač mora biti smešten blizu brizgača i to tako da mu se obezbedi pogodna mešavina koja će se lako pripaliti. U slučaju da se u komori sagorevanja sakupi prevvelika koli-



Sl. 57 — Vrste brizgača

čina goriva i oksidatora pre paljenja, može da nastane nekontrolisana eksplozija.

Paljenje varnicom-svećicom uspešno je upotrebljavano postavljanjem svećice na mesto gde pare goriva i oksidatora čine lako zapaljivu mešavinu. Ovaj tip paljenja je upotrebljen u raketi V-1.

Sistem paljenja pomoći baruta se uglavnom upotrebljava za čvrsta pogonska punjenja. Ovaj sistem se sastoji od barutne pripale, koja se može paliti električnim putem iz daljine, goreći toplim plamenom kratko vreme, što je ipak dovoljno da pripali glavno punjenje.

Paljenje uz pomoć katalizatora se zasniva na korišćenju čvrstog ili tečnog katalizatora, koji aktivira hemijsku dekompoziciju pogonske materije, prouzrokujući izduvne gasove visokog pritiska.

IZDUVNI MLAZNICKI MLAZNIH MOTORA

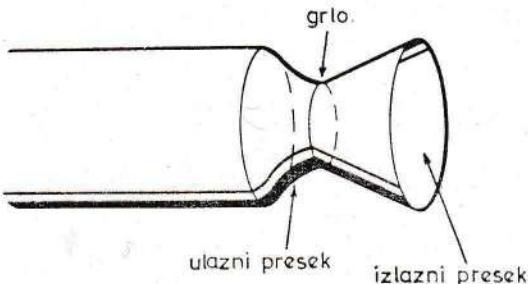
Gasovi stvorenici u komori sagorevanja ističu iz motora kroz izduvni mlaznik. Kod mlaznika postoje tri osnovna važna preseka: ulazni presek, presek grla i izlazni presek. Ovi preseci su prikazani na slici 58.

Uloga mlaznika je da poveća brzinu gasova. U uslovima stacioniranog isticanja, težina gasova koji protiču kroz svaki presek u jedinici vremena je konstantna (Bernulijeva teorema). Tako, prilikom dozvučnog strujanja brzina gasova mora da raste ako se presek struje sužava, dok težinski protok ostaje nepromenjen. Ako se, pak, presek širi, brzina gasova se smanjuje. Ovaj odnos između preseka i brzine važi za dozvučno strujanje gasova, ali ne važi za nadzvučno.

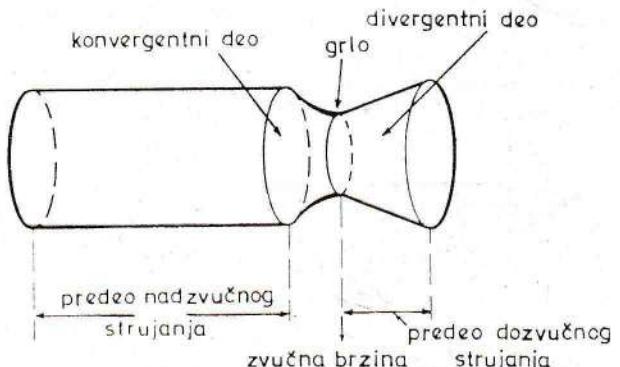
Brzine podzvučnog strujanja gase kroz mlaznik konvergentnog sužavajućeg tipa rastu sleva nadesno, i to tako da u izlaznom preseku dostižu 1 mah (brzina zvuka), pod pretpostavkom da je mlaznik dovoljno dugačak. (Kada se kaže da je brzina isticanja ravna brzini zvuka, onda se time ne misli na brzinu od 1220 km/h pri standardnim uslovima na zemlji, nego se misli na brzinu zvuka koja odgovara temperaturi u određenoj tački mlaznika).

Ako je brzina gasova na ulazu u mlaznik nadzvučna, ona se smanjuje pri prolasku kroz mlaznik konvergentnog tipa (sužavajući mlaznik).

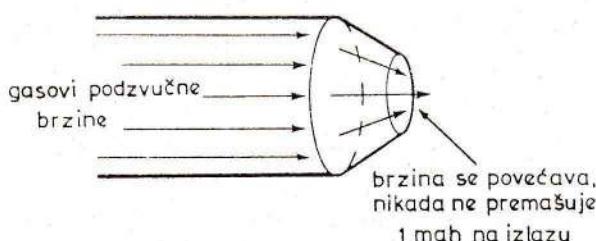
Kao što je pokazano na slici 60, nadzvučno strujanje se ubrzava prolaska kroz mlaznik divergentnog tipa. Naprotiv, dozvučno strujanje se usporava prolaska kroz takav mlaznik.



Sl. 58 — Elementi mlaznika



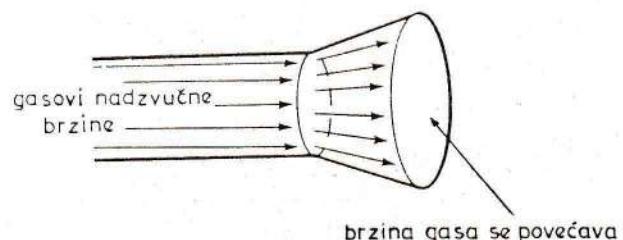
Sl. 60 — Nadzvučno isticanje iz divergentnog mlaznika



Sl. 59 — Dozvučno isticanje iz konvergentnog mlaznika

Ovo usporavanje dozvučne struje u saglasnosti je sa Bernulijevom teoremom; širenjem mlaznika presek se povećava, težinski protok ostaje konstantan, te brzina struje opada uz proporcionalno povećanje pritiska. Prilikom nadzvučnog strujanja, kroz divergentni deo mlaznika gasovi se šire, pritisak opada duž mlaznika pretvarajući potencijalnu energiju u kinetičku, odnosno povećava se brzina.

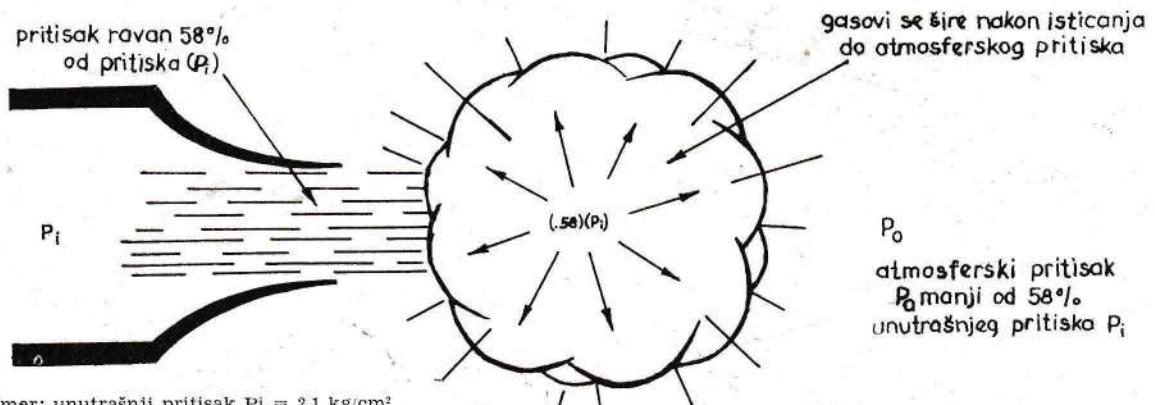
Da bi se postigle nadzvučne brzine isticanja, divergentni i konvergentni mlaznik raketnih



Sl. 61 — Konvergentno-divergentni Delavalov mlaznik

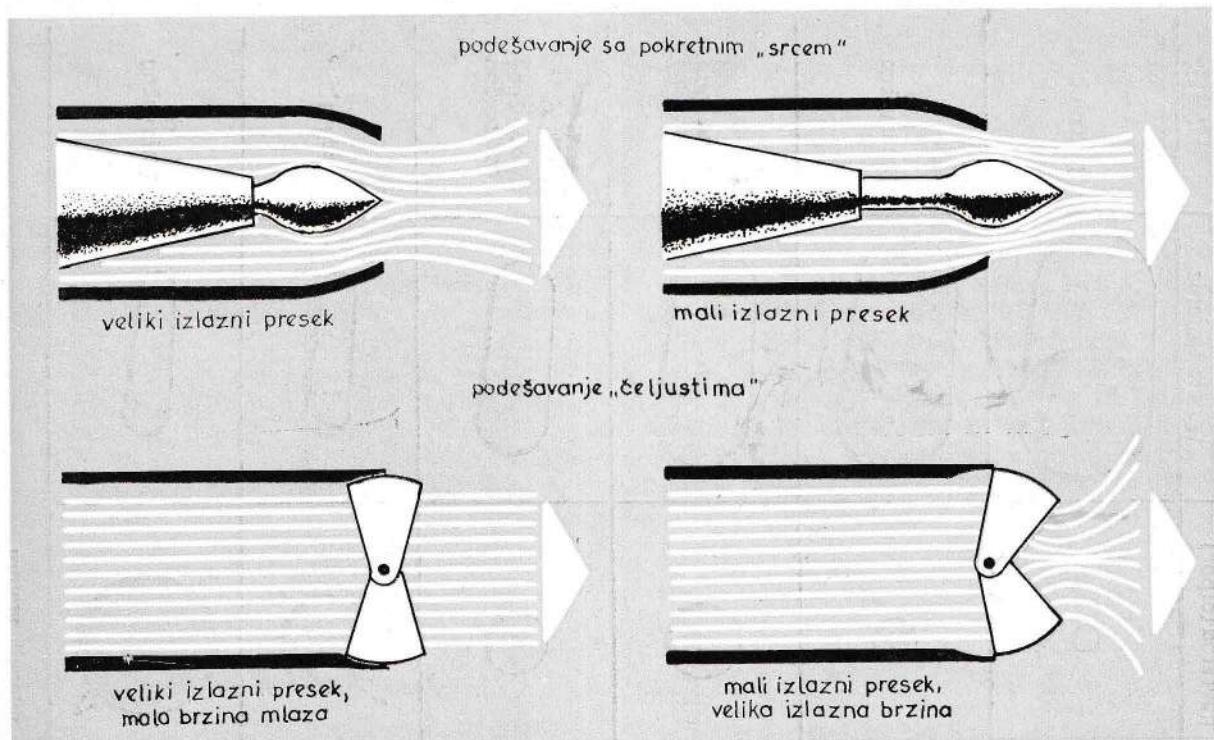
motora kombinuju se u jedan, kao što je prikazano na slici 61. Mlaznik se prvo sužava kako bi se povećala podzvučna brzina do lokalne brzine zvuka i tada, nastavljajući da struje kroz prošireni deo, gasovi se šire povećavajući nadzvučnu brzinu.

U mlaznom pogonu upotrebljavaju se dva tipa mlaznika, konvergentni i konvergentno-divergentni, ili kako se najčešće zove De Lavalov.



Primer: unutrašnji pritisak $P_i = 2,1 \text{ kg/cm}^2$
atmosferski pritisak (P_0) = 1 kg/cm^2
pritisak u grlu = 58% od $P_i = 0,58 \cdot 2,1 = 1,22 \text{ kg/cm}^2$
nekontrolisano širenje od $1,22$ do $1,0 \text{ kg/cm}^2$ (gubitak energije)

Sl. 62 — Nekontrolisano širenje gase van mlaznika



Sl. 63 — Mlaznici sa presecima koji se mogu podešavati

Konvergentni mlaznik se sastoji samo od konvergentnog dela sa grlo smeštenim na izlazu. Opiti isticanja gasa iz mlaznika ovog tipa pokazuju da, ako je pritisak pred mlaznikom za 58% veći od atmosferskog, onda gas zadržava natpritisak i nakon isticanja. Taj natpritisak, kao i nekontrolisano širenje gasova van mlaznika, predstavlja gubitak energije. Slika 62 ilustruje pomenuto nekontrolisano širenje gasa.

Konvergentni tip mlaznika, prema tome, konstruiše se za određenu kombinaciju pogonskih materija i karakteristika sagorevanja, da bi se postigle zvučne brzine isticanja.

Konvergentno-divergentni mlaznik omogućuje da se reguliše širenje gasova pošto oni prođu kroz grlo i time se dobije povećana brzina isticanja i povećani potisak. Ovde se, isto tako, presek grla određuje zadatim težinskim protokom. Izlazni presek divergentnog mlaznika određuje se željenim odnosom širenja između grla i izlaza.

Sve se češće upotrebljava mlaznik podešavajućeg tipa, prikazan na slici 63. Presek ovakvih mlaznika može se menjati da bi se isticanje u njima uskladilo sa stanjem u komori sagorevanja.

Pošto su opisane osnovne komponente mlaznih motora, mogu se objasniti neke posebne vrste mlaznih motora.

PROTOČNOMLAZNI MOTORI

Kao što je pomenuto u glavi I, svaki mlazni motor koji uzima kiseonik za sagorevanje iz okolne atmosfere, naziva se protočnomlaznim. U ovu grupu spadaju pulzirajućemlazni, nabojskomlazni, turbomlazni i turboelisni motori.

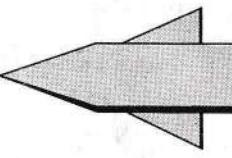
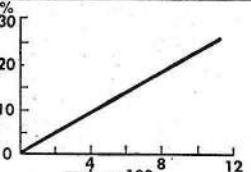
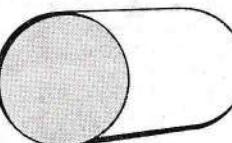
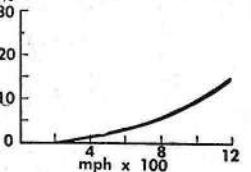
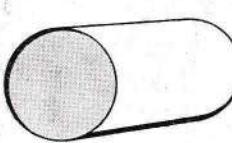
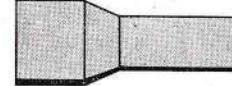
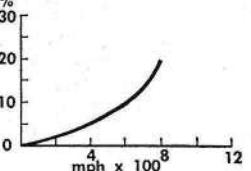
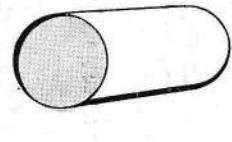
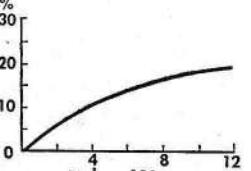
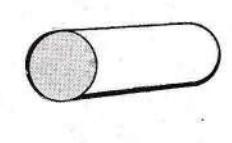
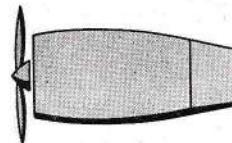
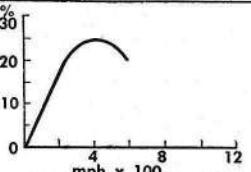
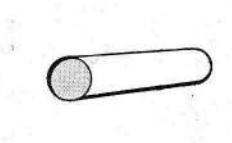
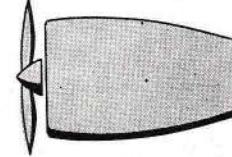
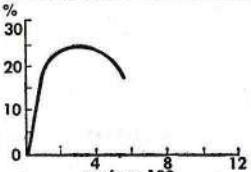
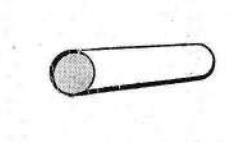
Korišćenje ovakvih motora može biti ograničeno raspoloživom količinom kiseonika. Oni mogu raditi samo na onim visinama do kojih je količina kiseonika dovoljna za rad motora. Visina korišćenja varira kod raznih motora.

Pre nego što se pojedinačno opišu tipovi ovih motora, treba pogledati sliku 64. Na njoj su uopšteno upoređene radne karakteristike raznih mlaznih motora.

PULZIRAJUĆEMLAZNI MOTOR

Ovi motori su dobili svoje ime po pulzirajućem procesu sagorevanja kojim se koriste. Nemačka leteća bomba V-1 dobijala je pogon od ovakvog motora i to je bila njegova prva primena.

Američka verzija V-1 je nosila oznaku JB-2. Istraživanje i razvoj na polju ovih motora od II svetskog rata pa nadalje poboljšali su njihove radne karakteristike, ali osnovna konstrukcija

vrsta pogona	skica motora	ukupni stepen dejstva (%)	relativna čeona površina (otpor)	relativna težina goriva za dato trajanje	domen brzine letenja
raketa		 % 30 20 10 0 mph x 100 4 8 12			nadzvučna
nabojsnomlazni motor		 % 30 20 10 0 mph x 100 4 8 12			nadzvučna
pulzirajućemlazni motor		 % 30 20 10 0 mph x 100 4 8 12			dozvučna i nadzvučna
turbomlazni motor		 % 30 20 10 0 mph x 100 4 8 12			dozvučna i nadzvučna
turboelisni motor		 % 30 20 10 0 mph x 100 4 8 12			do podzvučna
klipni motor sa prehranjuvanjem		 % 30 20 10 0 mph x 100 4 8 12			do podzvučna

Sl. 64 — Karakteristike raznih tipova mlaznih motora

je ostala ista. Mlazni motor, koji će se opisati u nastavku, primjenjen je za pogon JB-2. Postoje i neki motori nešto drugačijeg oblika i neki od njih će biti upisani na kraju ove glave.

SASTAVNI DELOVI MOTORA JB-2

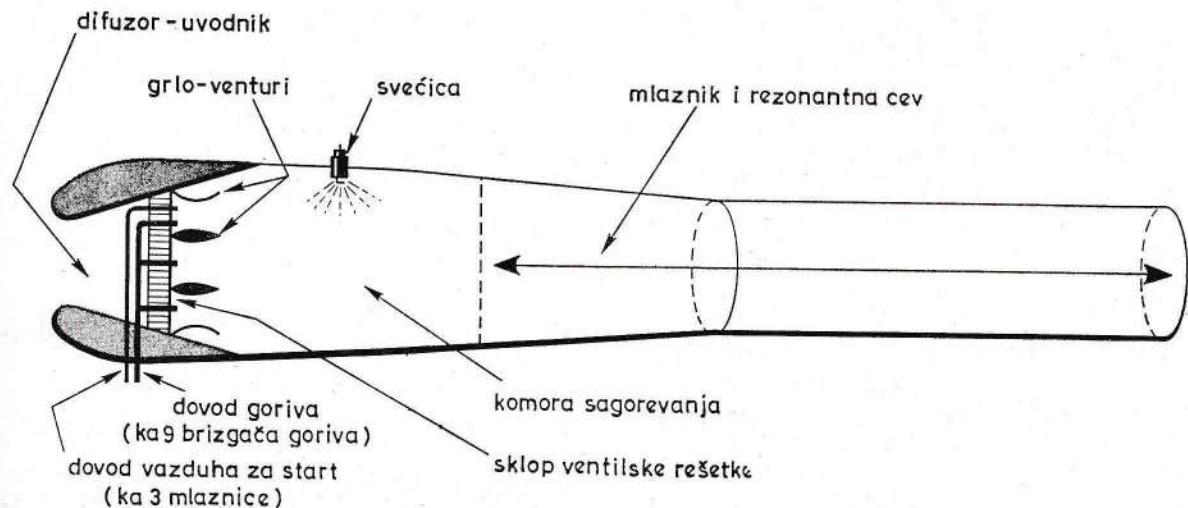
Pulzirajućemlazni motor ima sledeća 4 glavnata dela: uvodnik, sklop rešetke (vazdušni ventil), brizgači goriva), komoru sagorevanja i mlaznu cev.

Uvodnik. Definisan je kao kanal promenljivog preseka, koji usporava vazdušnu struju sa velike brzine na malu brzinu povećavajući joj pritisak. Uvodnik pulzirajućemlaznog motora povećava svoj presek u pravcu od ulaza ka rešetki. Vazduh, strujeći kroz uvodnik smanjuje

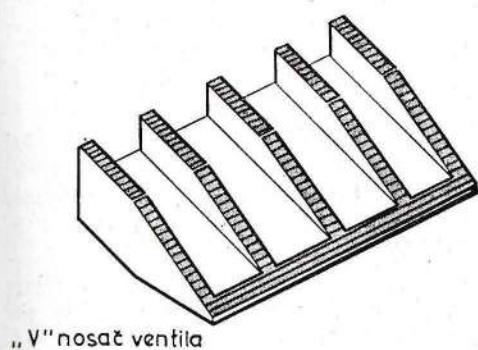
brzinu i povećava pritisak. Ovako povećani pritisak omogućava da se vazduh, kada uđe u komoru sagorevanja, u njoj brzo širi.

Sklop rešetke se sastoji od vazdušnih ventila sačasto raspoređenih, tri mlaznice za start i devet brizgača za gorivo.

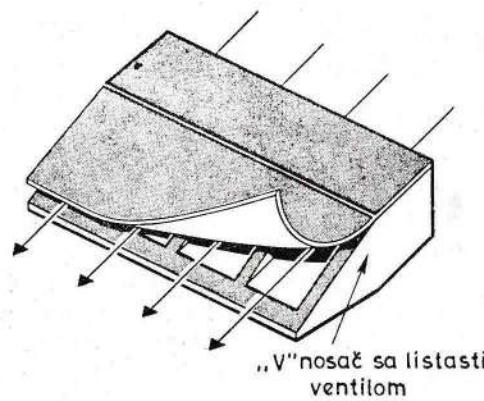
Osnovni elementi u rešetki su vazdušni ventili. Oni se sastoje od rebara V-oblika koji nose trakaste opruge od čelika. Ove trakaste opruge sa određenim prednaponom pritiskuju rebra na kojima leže u »normalnom zatvorenom položaju«. Kada je atmosferski pritisak u uvodniku veći od pritiska u komori sagorevanja, trakasti ventili su prinuđeni da se otvore. Suprotno, kada je pritisak u komori sagorevanja jednak statičkom pritisku u uvodniku ili veći od njega, ventili se zatvaraju.



Sl. 65 — Konstrukcija pulzirajućemlaznog motora

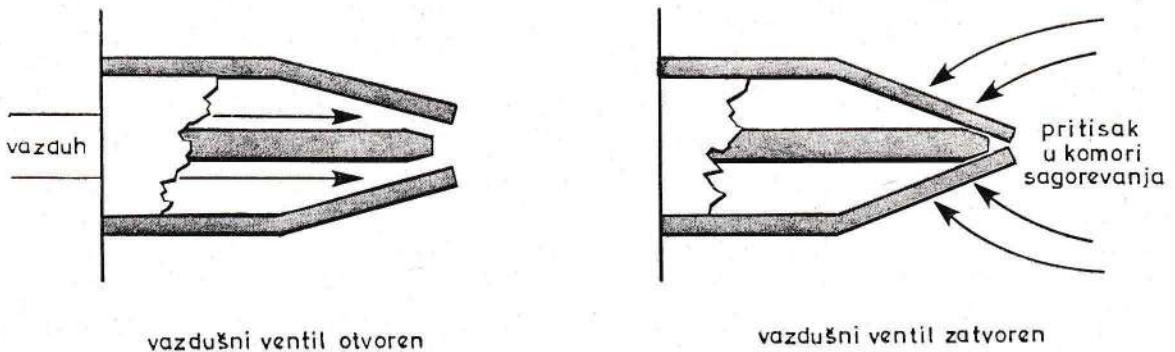


„V“ nosač ventila

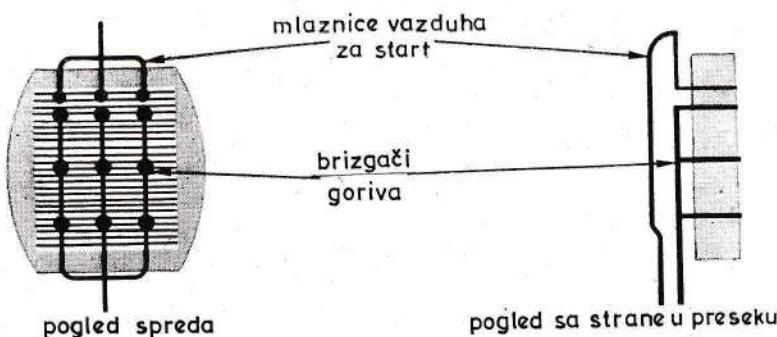


„V“ nosač sa listastim ventilom

Sl. 66 — Konstrukcija vazdušnih ventila



Sl. 67 — Rad vazdušnih ventila



Sl. 68 — Sklop rešetke sa vazdušnim mlaznicima i brizgačima goriva

Slika 67 pokazuje konstrukciju i rad jednog od mnogih ventila smeštenih u sklopu rešetke.

Vazdušni ventili su tako konstruisani da omogućuju odgovarajućim slaganjem izgradnju rešetke ma koje željene dimenzije.

Na slici 68 su prikazane tri vazdušne mlaznice za start motora; one su vezane za spoljni izvor sabijenog vazduha, čime se ostvaruje dovod kiseonika za početno sagorevanje. Ove mlaznice rade samo za vreme starta.

Na slici 68 je takođe pokazano devet brizgača goriva koji dobijaju gorivo preko cevova da iz spremnika u letelici. Gorivo se potiskuje stavljanjem spremnika pod pritisak.

Venturi-grla smeštene su neposredno iza sklopa rešetke i osiguravaju pravilno raspršivanje goriva i povećavaju njegovo mešanje sa vazduhom koji ulazi kroz vazdušne ventile.

Komora sagorevanja ima jednu svećicu koja varnicom obezbeđuje početno paljenje. Pošto je paljenje započelo, sagorevanje se nastavlja periodično, a da ga nije ponovno palila svećica.

Mlazna cev pulzirajućemlaznog motora ubrzava stvaranje gasovitih proizvoda sagorevanja i određuje učestanost ciklusa sagorevanja. Rad-

na učestanost se može izraziti sledećim odnosom:

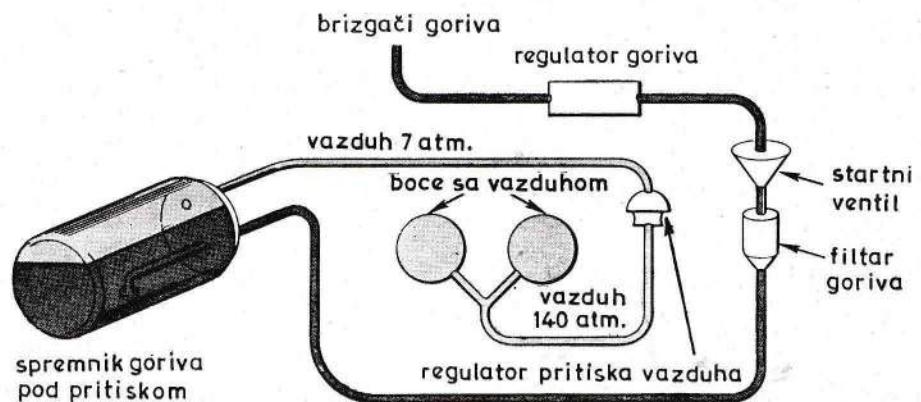
$$\text{Učestanost} = \frac{\text{brzina zvuka}}{4 \times \text{dužina mlazne cevi}}$$

Radna učestanost pulzirajućemlaznog motora JB-2 je oko 50 cikla u sekundi. U malim motorima sa kratkom mlaznom cevi učestanost sagorevanja može lako da pređe 200 sikla u sekundi.

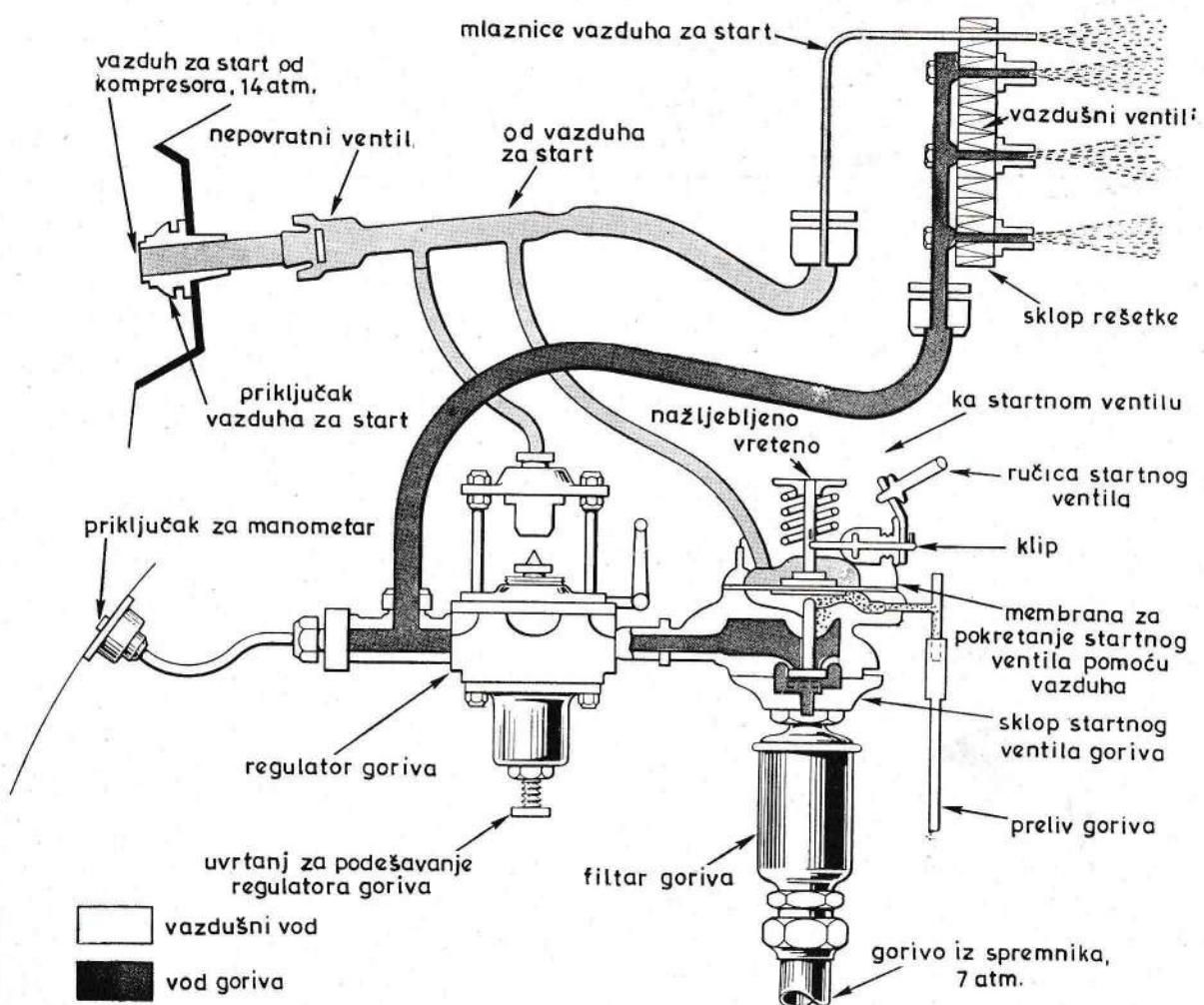
U letelici JB-2 gorivo je nošeno u čeličnim spremnicima zapremine 680 litara, a odатle posredstvom pritiska potiskivano u motor. Na slici 69 može se primetiti da je sabijen vazduh uskladišten u dve boce pod pritiskom od 140 kg/cm^2 , odakle se dalje odvodi i reducira do 7 kg/cm^2 uz pomoć regulatora pritiska. Ovakvim reduciranim pritiskom vazduh pritiskuje gorivo u rezervoaru. Iz rezervoara dalje gorivo prolazi kroz filter, startni ventil, regulator goriva sve do brizgača goriva.

U nastavku će biti opisan rad sistema goriva pulzirajućemlaznog motora, u kom cilju će se koristiti slika 70.

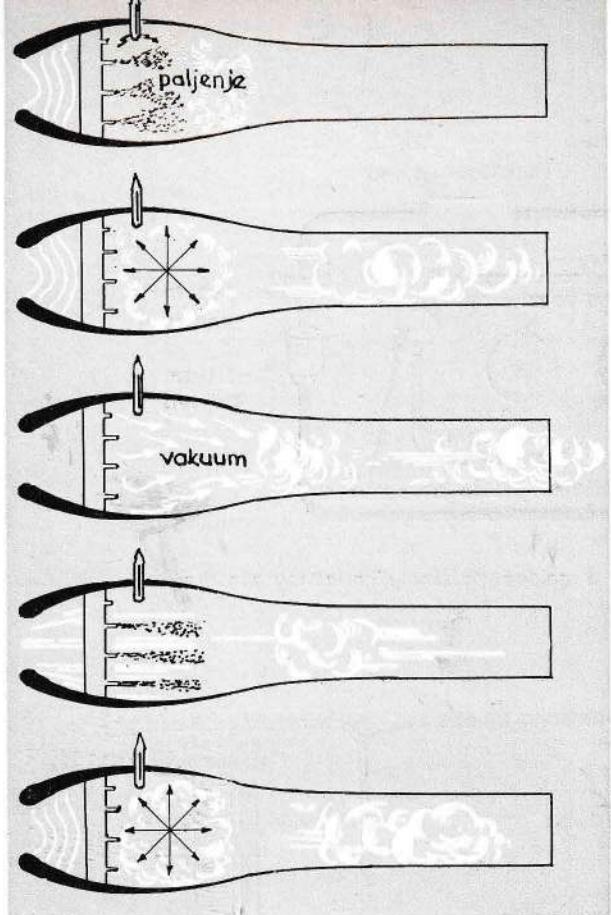
Za aktiviranje motora dovodi se spolja vazduh pod pritiskom od 13 do 14 atmosfera, na taj način što se sud sa sabijenim vazduhom priklju-



Sl. 69 — Sistem sabijenog vazduha i goriva pulzirajućemlaznog motora



Sl. 70 — Sistem goriva pulzirajućemlaznog motora



Sl. 71 — Ciklusi u pulzirajućem liaznom motoru

čuje za odgovarajući priključak, postavljen na spoljnoj strani trupa letelice. Uz pomoć spremnika pod pritiskom od 7 atmosfere, gorivo se potiskuje kroz filter goriva od startnog ventila. Zatim, kada se otvori pristup spoljnjem vazduhu, ovaj svojim pritiskom otvara nepovratni ventil i protiče kroz cevovod prikazan na slici sivom bojom. Ovaj vazduh se naziva »startnim«, pošto se koristi samo za vreme starta, a ima tri funkcije:

1. Vazduh ulazi u sklop startnog ventila i pritiskuje na gornju stranu dijafragme. Dijafragma potiskuje startni ventil klipnog tipa nadole, u donji položaj, omogućujući gorivu da struji naviše i oko ventila. Ventil goriva ostaje zatravljen u »otvorenom« položaju uz pomoć klipa brave vezane za odgovarajuću ručicu. Kada vreteno nad dijafragmom ide nadole, klip brave klizi po žljebu zajedno sa dijafragmom i startnim ventilom. U slučaju otkaza za vreme starta, dovod goriva se može zaustaviti povlačenjem ručice koja povlači klip brave iz nažlebljenog vretena, dozvoljavajući time dijafragmi i startnom ventilu da se podignu.

2. Vazduh ulazi u cilindar iznad regulatora goriva, u kome potiskuje jedan klip nadole, kako bi taj klip dotakao ručicu regulatora goriva (ne vidi se na slici). Na taj način se ograničava doticanje goriva u rešetku do predodređenog protoka. Ovaj postupak sprečava »plavljenje« motora gorivom za vreme starta.

3. Vazduh ulazi u komoru sagorevanja kroz tri startne mlaznice (ranije prikazane na slici 68), gde se meša sa gorivom stvarajući mešavinu za sagorevanje

Svećica je spojena sa izvorom struje napona 10.000 V; trup letelice je električno uzemljen.

Startni ventil vazduha je otvoren, dugme za aktiviranje takođe. Kao što je rečeno, startni vazduh omogućuje gorivu da prolazi kroz startni ventil goriva, regulator goriva i kroz devet brizgača goriva, gde se meša sa vazduhom iz tri mlaznice. Zavrtanj za podešavanje startnog ventila goriva je prethodno podešen da može da reguliše protok. Mešavina vazduha i goriva se pali električnom varnicom. Pošto je motor aktiviran, isključuje se dejstvo svećice i zatvara dovod vazduha.

Pošto se upalilo prvo punjenje goriva i vazduha, nastali pritisak u komori, usled brzog sagorevanja, ubrzava kretanje gasovitih proizvoda u svim pravcima. Nepovratni vazdušni ventili su zatvoreni tako da brzi gasovi koji se prostiru prema njima, ne mogu da izađu u tom pravcu. Ipak oni stvaraju jaku силу na sklop rešetke. Ova sila je komponenta potiska, a ona takođe deluje na otvore devet brizgača goriva, sprečavajući time da gorivo utiče u komoru za vreme procesa sagorevanja.

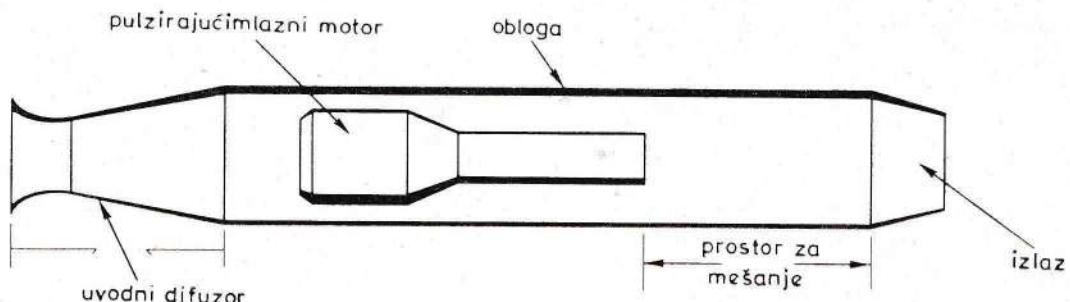
Na slici 71 su pokazani različiti ciklusi rada pulzirajućem liaznog motora tipa JB-2.

Na prvoj skici nepovratni ventili vazduha su zatvoreni. Pritisak na obe strane rešetke je isti. Startni vazduh iz spoljnog izvora ulazi pod pritiskom kroz tri vazdušne mlaznice, gorivo ulazi pod pritiskom kroz svoje mlaznice, svećica pali mešavinu vazduh — gorivo.

Mešavina vazduh — gorivo brzo sagoreva, pritisak u komori sagorevanja raste sprečavajući dovod goriva i držeći ventile vazduha u zatvorenom položaju, gasovi počinju da se šire.

Usijani gasovi brzo ističu iz mlazne cevi, tako da se u komori sagorevanja stvara potpritisak (delimičan vakum).

Na četvrtoj skici vazdušni nepovratni ventili su otvoreni čime omogućuju ulazak novom punjenju vazduha (pritisak u komori sagorevanja niži nego pritisak u uvodniku); novo punjenje goriva ulazi kroz brizgače goriva (pritisak u komori sagorevanja niži od pritiska goriva). Jedan



Sl. 72 — Osnovni izgled kanalisanog pulzirajućemlaznog motora

deo izduvanih gasova se vraća ka komori sagorevanja paleći time svežu smešu.

Mešavina gorivo — vazduh sagoreva brzo, pritisak u komori sagorevanja raste, vazdušni nepovratni ventili se zatvaraju, doticanje goriva se prekida i gasovi počinju da se šire.

Pošto ne postoji otpor unazad, gasovi se šire i ističu velikom brzinom. U stvari, to isticanje teče do nadekspansije, stvarajući time potpritisak u komori sagorevanja. U tom trenutku atmosferski pritisak u uvodniku, ili statički pritisak — kako se on zove kada je letelica u kretanju — opet je veći od pritiska u komori sagorevanja.

Razlika u pritiscima otvara vazdušne nepovratne ventile omogućujući time ulaz svežeg vazduha. U isto vreme, pritisak u dovodu goriva je veći nego pritisak u komori sagorevanja. Tako, novo punjenje goriva ulazi kroz brizgače. Potpritisak u komori sagorevanja takođe usisava usijane gasove koji ističu kroz mlaznik. Deo od tih gasova menja svoj smer kretanja vraćajući se u komoru i paleći svežu smešu. Ponovo počinje da raste pritisak u komori sagorevanja. Nepovratni vazdušni ventili se zatvaraju, a dovod goriva se zaustavlja. Usijani gasovi se šire izlazeći kroz mlaznu cev i stvarajući potpritisak u komori sagorevanja. Nepovratni vazdušni ventili se otvaraju, počinje dovod goriva i izduvni gasovi se uvlače nazad u komoru sagorevanja paleći novu smešu. Na taj način su opisani ciklusi u pulzirajućemlaznom motoru.

Pulzirajućemlazni motor, kao i onaj koji je upotrebljen na JB-2, ne razvija dovoljno startnog potiska potrebnog za poletanje sopstvenom snagom. On mora da bude potpomognut u radu do potrebne brzine nekim sredstvima za lansiranje.

Brzina leta ovakvim motorom je ograničena radom nepovratnih vazdušnih ventila. Ako brzina postaje prevelička statički pritisak u uvodniku je veći od onog u komori sagorevanja, tako da se ventili ne zatvaraju.

Ovakav motor je jeftin i prost, ekonomičan u radu, a može se primeniti kao pogonsko sredstvo za vođenje mete i eksperimentalne letelice.

KANALISANI PULZIRAJUĆEMLAZNI MOTOR

Uspešan rad klasičnog pulzirajućemlaznog motora je ograničen relativno malim brzinama letenja. Sa porastom brzine raste i pritisak u uvodniku, tako da su potrebni veći pritisci u komori sagorevanja da bi držali zatvorene vazdušne ventile tokom dovoljno dugog dela ciklusa; u isto vreme smanjeno je povratno strujanje kroz izlazni otpor mlazne cevi kao i kompresija u komori sagorevanja. Postaje sve teže da se procesom sagorevanja održava pritisak dobijen statičkim radom motora; jedva se održava pritisak dovoljno velik da savlada statički pritisak u uvodniku, odnosno, ventili ostaju otvoreni suviše dugo u svakom ciklusu. Pri otprilike 0,6 maha, motor prestaje da radi.

Činjeni su pokušaji da se proširi radni domen pulzirajućemlaznih motora ka većim Mahovim brojevima. Jedan od tih pokušaja je bio da se postavi takav motor u unutrašnjost jedne obloge koja je tako konstruisana da je proticanje vazduha oko mlaznog motora uvek na malim Mahovim brojevima. Kod ovakve pogonske grupe, zvane »kanalisani pulzirajućemlazni motor«, razlika pritiska na ulazu u vazdušne ventile i statičkog na ulazu iz mlazne cevi je takva da praktično prestaje biti smetnja. Ako je konstrukcija obloge pogodna, motor bi mogao da radi pri svim Mahovim brojevima. Dalje, ovakva šema dozvoljava da motor koristi kompresiju za zaustavljanje, koja se inače ne koristi u klasičnom pulzirajućemlaznom motoru.

Konstrukcija jednog ovakvog kanalisanog motora je prikazana na slici 72.

Vazduh ulazi u oblogu kroz uvodni difuzor gde se usporava do malog Mahovog broja. Jedan deo tog vazduha se koristi za rad pulziraju-

čemlaznog motora. Izduvni gasovi iz takvog motora mešaju se sa ostalim vazduhom. Najzad, takva mešavina ističe kroz izlazni otvor u atmosferu.

NABOJNOMLAZNI MOTOR

Svoje ime ovakav motor duguje nabojsno-zaustavljućem efektu vazduha koji omogućava njegov rad. Ponekad, on se naziva i »atotid« što bi na engleskom jeziku bila skraćenica od Aero-thermodynamic-duct (aerotermodinamička cev).

Teoretski, rad nabojsnomlaznog motora ograničen je visinom od 30.000 metara, pošto mu je neophodan kiseonik za sagorevanje.

Brzine koje se mogu postići sa nabojsnomlaznim motorom su teoretski neograničene. Stvarno, što brže leti, to bolje radi i razvija veći pritisak. Njegova brzina je ipak ograničena na otprilike 5 Maha, pošto u tom slučaju povišena površinska temperatura, nastala usled trenja, počinje da oštećuje metalnu konstrukciju motora. Glavni nedostatak nabojsnomlaznog motora je u tome što on zahteva utoliko veće brzine lansiranja ukoliko je konstruisan za veće brzine leta. Domen brzine za koju je ovakav motor projektovan je baza za njegovu klasifikaciju; tako, postoji dozvučni i nadzvučni nabojsnomlazni motor.

SASTAVNI DELOVI NABOJNOMLAZNOG MOTORA

U osnovi, nabojsnomlazni motor se sastoji od cevi u obliku cilindra, otvorene na oba kraja, u kojoj je smešten sistem za ubrizgavanje goriva. Motor je sasvim jednostavne konstrukcije i nema pokretnih delova. Iako svi nabojsnomlazni motori imaju iste sastavne delove, konstrukcija im je donekle različita jer se zahvaljujući tome postiže zadovoljavajući rad u raznim domenima brzina. Neophodne izmene su objašnjene u nastavku u kome se govori o dozvučnom, niskonadzvučnom i visokonadzvučnom nabojsnomlaznom motoru.

Osnovni elementi nabojsnomlaznog motora su:

Uvodnik

Komora sagorevanja sa sledećim delovima:
brizgači goriva
svećice
stabilizator plamena
izduvni mlaznik

Uvodnik služi za istu svrhu kao kod pulzirajućemlaznog motora. On smanjuje brzinu i povećava pritisak ulaznog vazduha. Pošto nema niti zida niti zatvorene rešetke na prednjem de-

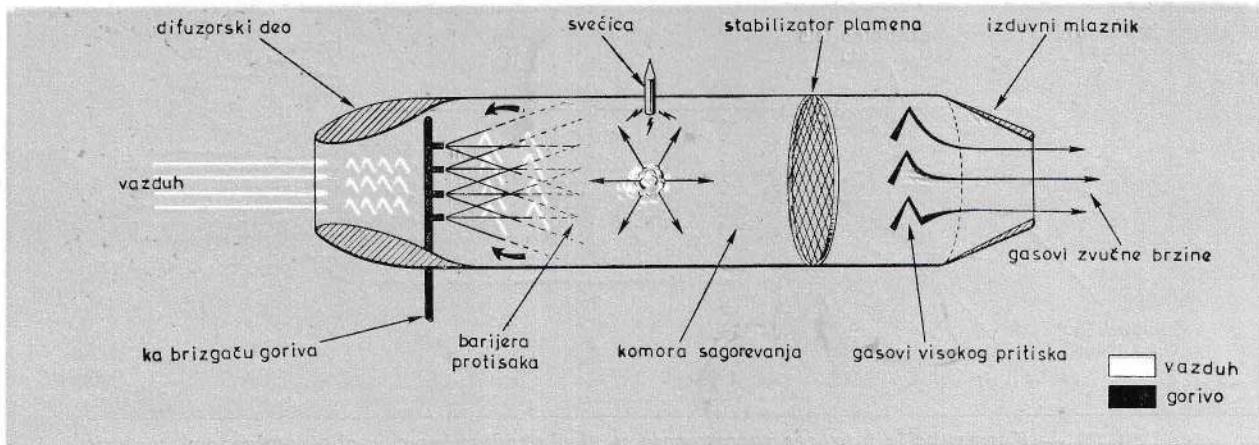
lu motora, pritisak u uvodniku mora da bude dovoljno velik da spreči izlazak gasovitih produkata sagorevanja kroz prednji deo motora. Uvodnik mora biti konstruisan za datu ulaznu brzinu, ili predodređenu brzinu leta. Drugim rečima, željena barijera pritiska se samo uspostavlja kada vazduh ulazi u uvodnik brzinom za koju je uvodnik konstruisan. Idealno bi bilo kada bi nabojsnomlazni motor imao tako konstruisan uvodnik da se automatski podešava prema promenljivoj brzini leta.

Naravno, komora sagorevanja je prostor u kome se odvija proces sagorevanja i u kome se stvaraju gasovi visokog pritiska. Nasuprot pulzirajućemlaznom motoru, nabojsnomlazni motor radi sa kontinualnim dovodom goriva i vazduha, te prema tome i sa kontinualnim sagorevanjem. Brizgači goriva su priključeni za sistem goriva kontinualnog dejstva koji obezbeđuje dovoljno visok pritisak gorivu, tako da se gorivo dovodi u komoru sagorevanja gde vlada povišeni pritisak. Sagorevanje se započinje paljenjem uz pomoć svećice sa varnicom; kad je jedanput započelo, nastavlja se i održava bez spoljnog paljenja. Stabilizator plamena sprečava da se plameni front povuče suviše nazad ka izlaznom otvoru, održavajući time stabilno sagorevanje na ograničenom prostoru. Stabilizator plamena takođe osigurava da temperatura u komori sagorevanja ostane dovoljno visoka da podržava sagorevanje.

Izduvni mlaznik ima istu funkciju kao i kod pulzirajućemlaznog motora i kao kod svakog drugog mlaznog motora.

Konstrukcija i rad dozvučnog nabojsnomlaznog motora. Dozvučni nabojsnomlazni motor ne može da razvije statički potisak; prema tome, on ne može da poleti sopstvenom snagom. Ako bi se aktivirao na zemlji, proizvodi sagorevanja visokog pritiska isticali bi kako napred tako i nazad. Da bi uspešno radio, motor mora biti lansiran do odgovarajuće dozvučne brzine, tako da vazduh koji ulazi u uvodnik postiže pritisak dovoljno visok da omogući isticanje gasova samo prema nazad. Obratiti pažnju na jednostavnu konstrukciju cevi, kao i na otvore na njenoj prednjem i zadnjem kraju, što se vidi na slici 73 koja predstavlja dozvučni nabojsnomlazni motor.

Vazduh, prolazeći kroz uvodnik — difuzor, smanjuje brzinu povećavajući sopstveni pritisak, što se može videti na slici. To je posledica postupnog povećanja preseka uvodnika (Bernullijeva teorema nestišljivog fluida). Gorivo se ubrizgava u komoru sagorevanja kroz odgovarajuće brizgače. Raspršeno gorivo se potpuno meša sa ulazećim vazduhom i takva mešavina



Sl. 73 — Konstrukcija i proces sagorevanja u dozvučnom nabojnomlaznom motoru

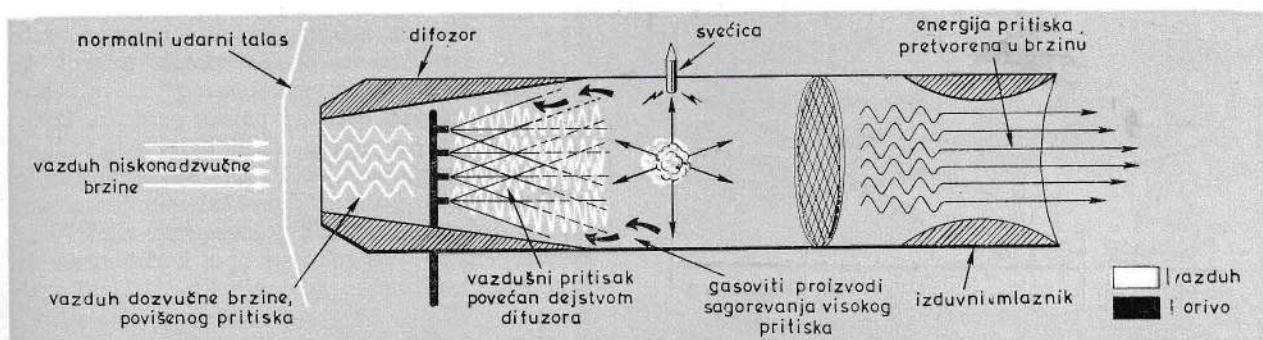
se pali uz pomoć električne varnice. Kao što je rečeno, pošto je ostvareno početno paljenje, sagorevanje se nastavlja spontano, tj. nema potrebe za daljim paljenjem.

Gasovi, kao rezultat procesa sagorevanja, napreduju u svim pravcima (to na slici pokazuju streljice u centru komore sagorevanja). Gasovi koji se šire prema napred zaustavljeni su zidom visokog vazdušnog pritiska i kosim unutrašnjim stranicama difuzora, što je pokazano na slici kratkim, debelim, crnim strelicama. Jedini slobodan pravac za širenje gasova je onaj kroz izduvni mlaznik; u njemu se desava važan preobražaj energije. Naime, potencijalna energija pritiska gasovitih proizvoda sagorevanja pretvara se u kinetičku energiju — u brzinu. Još preciznije rečeno, gasovi visokog pritiska ulaze u mlaznik brzinom koja je ispod vlastite brzine zvuka. U slučaju mlaznika konvergentnog tipa, energija pritiska gase opada, dok brzina raste, sve do vlastite brzine zvuka u izlaznom preseku mlaznika.

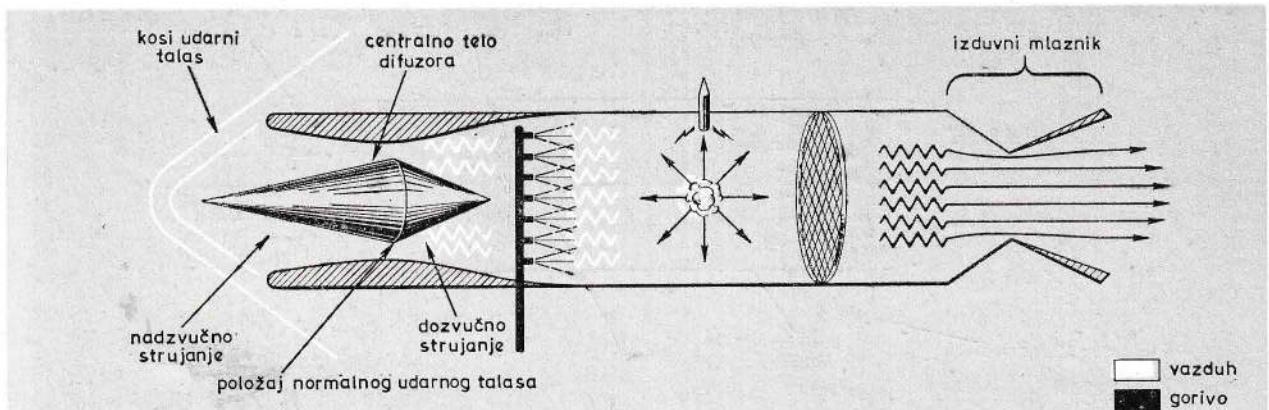
Potisak koga razvija nabojnomlazni motor je rezultat neuravnoteženih sila koje dejstvuju

prema napred i prema nazad. Gasoviti proizvodi sagorevanja pritiskuju kose strane difuzora i zajedno sa »zidom« od koćećeg pritiska vazduha stvaraju silu usmerenu napred. Ova sila nije uravnotežena silom gasova koji ističu kroz mlaznik. Neuravnotežena sila stvara potisak.

Konstrukcija i rad niskog nadzvučnog nabojnomlaznog motora. Da bi se niski nadzvučni nabojnomlazni motor stavio u rad, on mora biti lansiran do nadzvučne brzine približno jednakoj radnoj brzini i tek se onda aktivira sagorevanje — pripali se. Kada brzina leta nabojnomlaznog motora postane nadzvučna, dolazi do formiranja udarnog talasa na ulazu u difuzor. Položaj normalnog udarnog talasa je pokazan na slici 74. Na suprotnoj strani normalnog udarnog talasa strujanje slobodnog vazduha je niskonadzvučno. Prolaskom vazduha, koji se kroz udarni talas kreće nadzvučnom brzinom, dolazi do naglog pada brzine, tj. brzina postaje dozvučna, a pritisak u odgovarajućoj meri raste. Tako, formiranje udarnog talasa prouzrokuje znatan porast pritiska na ulazu u difuzor. Daljim proticanjem vazduha dozvučne brzine kroz diver-



Sl. 74 — Konstrukcija i proces sagorevanja u niskonadzvučnom nabojnomlaznom motoru



Sl. 75 — Konstrukcija i proces sagorevanja u visokonadzvučnom nabojnomlaznom motoru

gentni difuzor nastaje dodatni porast pritiska i smanjenje brzine. Tako pripremljen sabijen vazduh je spreman za sagorevanje.

Proces sagorevanja je u osnovi isti kao onaj u dozvučnom nabojnomlaznom motoru. Gorivo se meša sa vazduhom relativno visokog pritiska, mešavina se pali posredstvom električne varnice, nakon čega nastaje kontinualno sagorevanje. Potencijalna energija gasovitih proizvoda sagorevanja se u mlazniku pretvara u kinetičku energiju.

Konvergentno-divergentni mlaznik, prikazan na slici, omogućuje da gasovi prevaziđu brzinu zvuka. Prema tome, ako je pravilno konstruisan, nabojnomlazni motor može da leti efikasno i pri nadzvučnim brzinama.

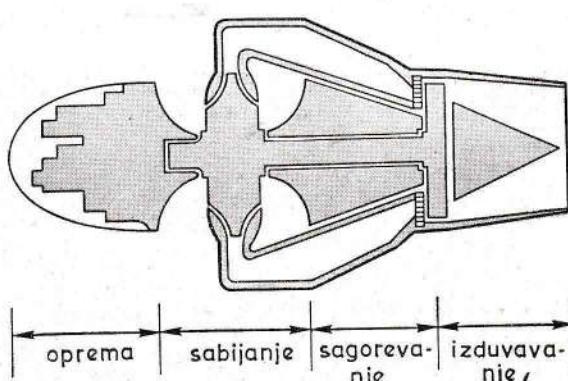
Konstrukcija i rad visokonadzvučnog nabojnomlaznog motora. Razmatrajmo nabojnomlazni motor koji će se kretati visokim nadzvučnim brzinama, recimo od 2 Maha. Pri tolikim brzinama stvaraju se, na ulazu u difuzor, udarni talasi kosog i normalnog tipa. Brzina ispod kosog udarnog talasa je visokonadzvučna. Kada nadzvučna struja vazduha prođe kroz kosi udarni

talas, povećava se pritisak i smanjuje brzina, ali i dalje ostaje nadzvučna. Na primer, vazduh sa slobodnom brzinom strujanja od 2.400 km/h može da prođe kroz kosi udarni talas da zadrži brzinu od 1450 km/h. Dalje, kada vazduh nadzvučne brzine protiče kroz difuzor divergentnog tipa, kao što je pokazano na slikama 73 i 74, povećava se brzina i smanjuje pritisak. Prema tome, difuzor visokonadzvučnog nabojnomlaznog motora mora biti tako konstruisan da se kosina udarnih talasa postepeno smanjuje od ulaza u difuzor do komore sagorevanja, sve do momenta kada se formira normalni udarni talas koga sledi dozvučna brzina strujanja.

Takva transformacija energije se postiže upotrebom difuzora čija je konstrukcija, prikazana na slici 75. Centralno telo u difuzoru smanjuje kosinu udarnih talasa, omogućujući time vazduhu nadzvučne brzine da utiče u difuzor.

Brzina nadzvučne struje vazduha postepeno opada kroz konvergentni deo difuzora, uz odgovarajući porast pritiska. U jednom preseku difuzora, gde se brzina vazduha približuje lokalnoj brzini zvuka, dolazi do formiranja normalnog udarnog talasa. Kao što je ranije rečeno, nisko nadzvučna vazdušna struja, prolazeći kroz normalni udarni talas, trpi skokovit pad brzine i porast pritiska. Dalje, vazduh dozvučne brzine, nastale prolaskom kroz normalni udarni talas, protiče kroz divergentni deo difuzora u komu trpi dalji pad brzine i porast pritiska. Ovde ponovo dolazi do pojave »zida« pritiska na ulazu u komoru sagorevanja. Proses sagorevanja je isti kao onaj opisan za dozvučni nabojnomlazni motor. Izduvni mlaznik pokazan na slici 75 je konvergentno-divergentnog tipa, konstruisan da proizvede nadzvučno isticanje kroz izlazni presek.

Nabojno-mlazni motor se konstruiše tako da radi optimalno na zadatoj brzini i visini. Kod

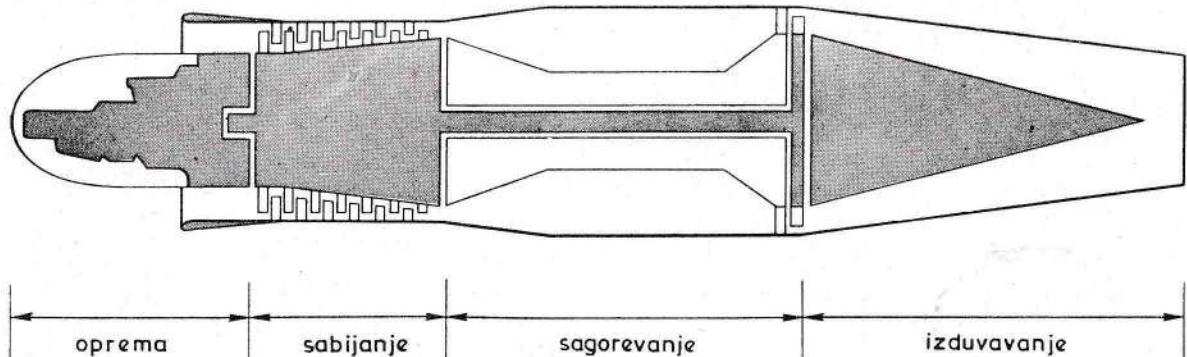


Sl. 76 — Turbomlazni motor sa centrifugalnim kompresorom

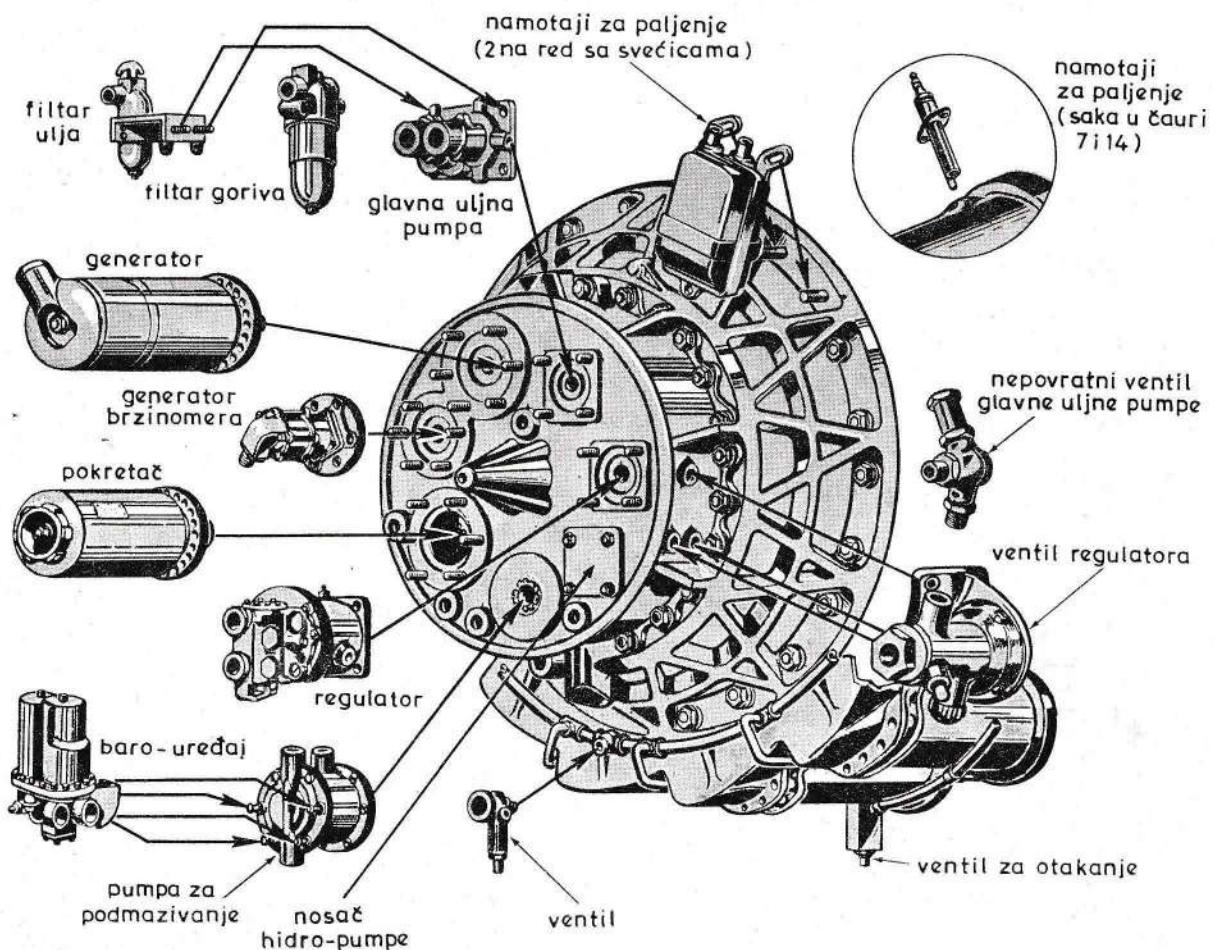
difuzora koji rade sa kosim udarnim talasima proces pretvaranja kinetičke energije u energiju pritiska je mnogo ekonomičniji nego u slučaju mlaznika konstruisanih za dozvučno uticanje, ili onih sa normalnim udarnim talasima. Prema tome, nabojnomlazni motori bolje rade pri visokim nadzvučnim brzinama.

TURBOMLAZNI MOTORI

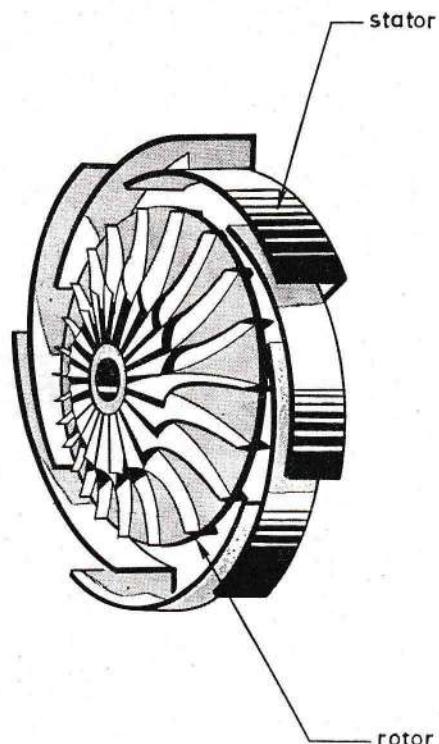
Turbomlazni motor je sredstvo za pogon, termičkog tipa, koji je zavisan od atmosfere. Turbomlazni motor nosi naziv po svojoj konstrukciji, tj. zato što za pokretanje turbine odnosno kompresora koristi izduvne gasove.



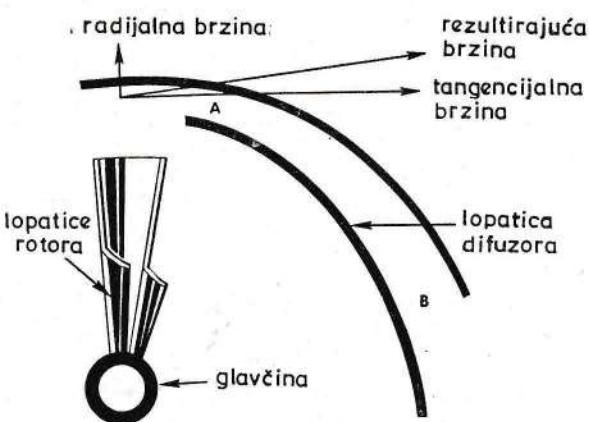
Sl. 77 — Turbomlazni motor sa aksijalnim kompresorom



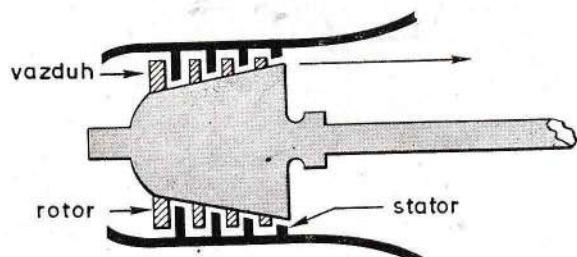
Sl. 78 — Oprema turbomlaznog motora



Sl. 79 — Kompresor centrifugalnog tipa



Sl. 80 — Protočni presek centrifugalnog kompresora



Sl. 81 — Četvorostepeni aksijalni kompresor

Podela turbomlaznih motora. Turbomlazni motori se mogu podeliti u dve glavne grupe, u zavisnosti od tipa upotrebljenog kompresora. Radi se o kompresoru *centrifugalnog tipa* kod koga je pravac strujanja normalan na uzdužnu osu motora, i kompresoru *aksijalnog tipa* kod koga je pravac strujanja paralelan sa uzdužnom osom motora. Na slikama 76 i 77 prikazana su ova dva tipa motora.

Sastavni delovi turbomlaznih motora. Princip rada ova dva tipa motora je u osnovi isti. Oba imaju iste osnovne delove, koji su prikazani na slikama 76 i 77: opremu i pribor, kompresor, komoru sagorevanja, turbinu i mlaznike.

Oprema. Na prednjem delu motora smještena je oprema, razni elementi motora i prednji nosač motora. Pod opremom se podrazumevaju delovi koji nisu suštinski neophodni za rad motora, kao generator, hidraulička pumpa, pokretač i obrtomer. Pod elementima motora misli se na sistem goriva i ulja koji direktno uslovjavaju rad motora. Kućište, na prednjem delu motora, služi kao rezervoar ulja i za smeštaj zupčastog prenosa pogona opreme.

Oprema o kojoj je bilo reči je pokazana na slici 78.

Kompresor. Primarna uloga kompresorskog dela turbomlaznog motora je da primi, sabije i razvede veliku masu vazduha do komora sagorevanja.

Na slici 79 je prikazan *centrifugalni kompresor* koji se uglavnom sastoји od statora ili po neki put zvanog *difuzorskog sklopa* i *rotora* ili *kola*. Rotor se sastoji od niza lopatica koje se pružaju radijalno od osovine obrtanja.

Najčešće se upotrebljava kompresor sa »dvostrukim« rotorom, u koji vazduh utiče sa obe strane. Obrtanjem rotora usisava se vazduh, saopštavajući pri tome uz pomoć lopatica viorno kretanje, i izbacuje se radijalno velikom brzinom, stvorenom centrifugalnom silom.

Stator se sastoji od lopatice difuzora, koje sabijaju i usmeravaju vazduh u komore sagorevanja. Vazduh koji napušta rotor ima veliku rezultantnu brzinu usmerenu na lopatice difuzora. Energija koju vazdušna masa prima u rotoru kao brzinu pretvara se u pritisak preko procesa difuzije, tj. strujanjem iz manjih preseka u veće. To se može videti na slici 80 gde vazduhu raste pritisak, a opada brzina, pri kretanju iz preseka A u presek B.

Aksijalni kompresor je sličan elisi. I ovde je rotor sastavljen iz niza lopatica postavljenih pod uglom i radijalno prema centralnoj osi. Obrtanjem rotora kompresora lopatice saopštavaju vazduhu koji ulazi s prednje strane motora ki-

netičku energiju u tangencijalnom i aksijalnom pravcu. Tipični stator aksijalnog kompresora ima niz lopatica poredanih kružno po unutrašnjem zidu kompresorskog kućišta, neposredno iza rotora, pružajući se radijalno prema centralnoj osi motora.

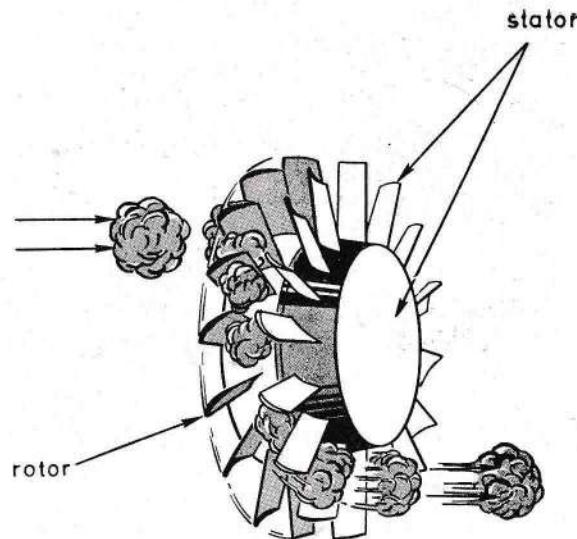
Stator se ne obrće. Lopatice su mu postavljene pod uglom, tako da skreću vazdušnu struju koja napušta izlaznu ivicu prvog stepena lopatica rotora i usmeravaju je u lopatice drugog stepena rotora. *Jedan rotor i jedan stator čine jedan stepen kompresora.* Nekoliko rotora i statora čine višestepeni kompresor.

Primer višestepenog kompresora je prikazan na slici 81.

Vazduh iz prvog reda lopatica se ubrzava povećavajući kinetičku energiju. Ulaskom i prolaskom kroz kolo statora ta se energija pretvara u energiju pritiska jer se smanjuje brzina vazduha. Ovaj ciklus se ponavlja kroz svaki nadredni stepen. Prema tome, povećanjem broja stepena može se podići pritisak do željene visine. Na slici 82, radi jasnoće, statorsko kolo je predstavljeno sa lopaticama usmerenim od ose ka periferiji, dok se stvarno najčešće izvodi obratno, od periferije ka centru.

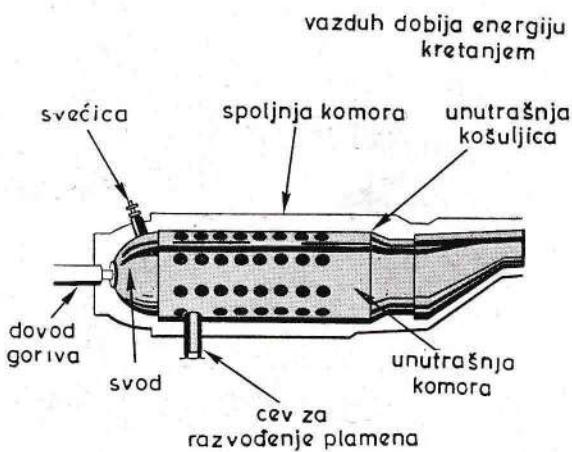
I kod centrifugalnih i kod aksijalnih kompresora stepen sabijanja se definiše kao odnos izlaznog pritiska prema ulaznom pritisku. Poraštom brzine obrtanja raste zapreminska protok vazduha. Pri dатој brzini obrtanja, zapreminski protok opada sa povećanjem odnosa pritiska. Iznad određenog odnosa pritiska stepen dejstva naglo pada za dati broj obrtaja. Ovaj pad se objašnjava nastajanjem pulzacije u pritisku vazduha koji protiče.

Komore sagorevanja. Proces sagorevanja se odvija u tzv. komorama sagorevanja, dok se paljenje vrši svećicama sa varnicom. Na delu motora gde su smeštene komore sagorevanja nalaze se još i sprovodno kolo turbine i osovina koja vezuje turbinu i kompresor. U oba tipa motora komore sagorevanja imaju istu funkciju i daju iste rezultate. Ponekad se one ne razlikuju samo po veličini i broju, već i po tipu motora. Tako, jedan motor sa kompresorom centrifugalnog tipa ima 14 komora sagorevanja, i svećice su im smeštene u komorama br. 7 i br. 14. Jedan drugi motor sa aksijalnim kompresorom ima osam komora i dve svećice smeštene dijagonalno suprotno u dve komore. U svakom slučaju, komore sagorevanja imaju sledeće sastavne delove: spoljnju oblogu, unutrašnju košuljicu, svod unutrašnje košuljice, cev za razvođenje plamena i brizgač goriva. Na slici 83 prikazani su pomenuti delovi.

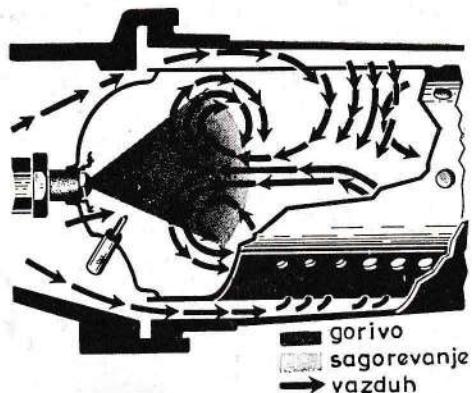


Sl. 82 — Rad jednostepenog aksijalnog kompresora

Spoljna obloga služi za prihvatanje i razvođenje vazduha visokog pritiska u pojedine sekcije unutrašnje košuljice. Ovaj vazduh u isto vreme služi za hlađenje. Unutrašnja košuljica ograničava prostor u kome se dešava mešanje goriva i vazduha, kao i sagorevanje. Veliki broj rupa na košuljici omogućuje vazduhu da se meša sa gorivom i toplim gasovitim proizvodima sagorevanja. Veliki broj rupa na košuljici omogućuje vazduhu da se meša sa gorivom i toplim gasovitim proizvodima svoda, kako bi se omogućilo širenje ili skupljanje košuljice usled toplotnog dejstva prilagodila toplotnom širenju i skupljanju. Zadnji kraj košuljice i zadnji kraj obloge su suženi kako bi se povećala izlazna



Sl. 83 — Konstrukcija komore sagorevanja turbomlaznog motora



Sl. 84 — Strujanje i sagorevanje u komori turbomlaznog motora

brzina gasova radi ulaska u sprovodno kolo turbine. Cev za razvođenje plamena spaja susedne komore, omogućujući time da se plamen iz one dve komore u kojima je izvršeno paljenje uz pomoć svećica razvodi u sve komore. Slika 84 ilustruje proces ubrizgavanja goriva, uvođenje vazduha, međusobno mešanje goriva i vazduha i sagorevanje.

Turbina i mlaznik. Proces širenja započinje u sprovodnom aparatu turbine, nastavlja se u obrtnom kolu turbine i završava se u mlazniku. Na slici 85 se vidi da je mlaznik sastavljen od jednog limenog cilindra u čijem je središtu smeštena limena kupa. U mlazniku se ispravlja struja gase, koji je dobio vihorano kretanje u obrtnom kolu, i ubrzanje gase, čime se formira pravilan mlaz.

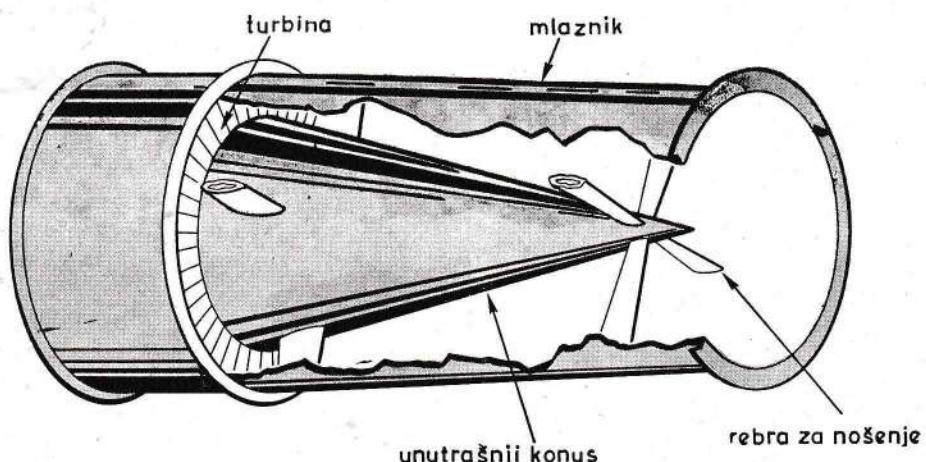
Sprovodni aparat turbine, koji je već pomenut, sastavljen je od velikog broja zakriveljnih lopatica smeštenih po jednom krugu ispred turbinskog kola, a normalno na pravac struje gase,

Među lopaticama sprovodnog aparata se dešava ubrzanje i skretanje gase za 90°. Ove lopatice se ne obrću.

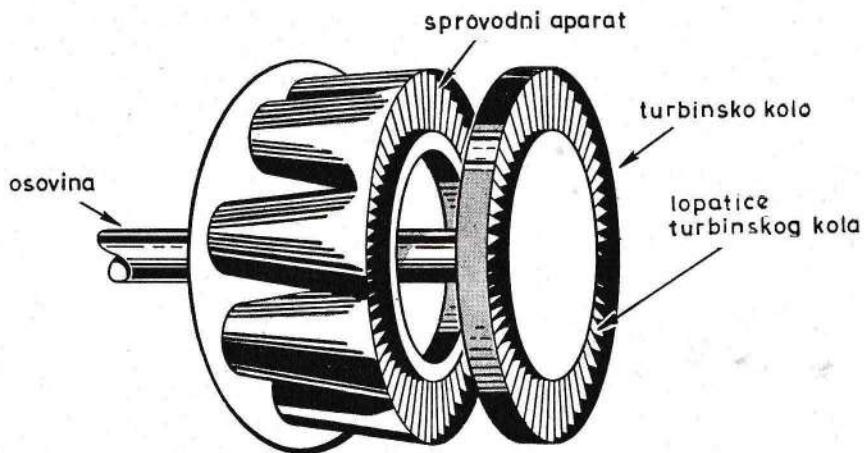
Iz sprovodnog aparata gasovi ulaze u obrtno kolo turbine, kome predaju jedan deo svoje energije, čineći time da se ovo kolo obrće. Osovina turbine je spregnuta sa osovinom kompresora, tako da se zajedno obrće. Tim načinom je omogućeno da se jedan deo energije gasova koristi za pogon kompresora i opreme.

Rad turbomlaznog motora. Uopšte, rad turbomlaznog motora se može prikazati na sledeći način: uz pomoć pokretača, koji je preko odgovarajućih zupčanika spregnut sa osovinom kompresora, kompresor i turbinu se ubrzaju do dozvoljenih obrtaja (pokretač je spregnut samo za vreme starta), spoljni vazduh biva usisavan, sabijan i potiskivan u komore sagorevanja; gorivo se pod pritiskom ubrizgava i meša sa vazduhom; mešavina se pali prvo u komorama koje imaju svećice da bi se proširilo i na ostale komore uz pomoć cevi za razvođenje plamena; gasoviti proizvodi sagorevanja visokog pritiska plus preostali vazduh dotiču u sprovodni aparat i protiču kroz njega, a potom ulaze u turbinsko kolo pod povoljnim uglom; veliki deo energije gasova se predaje turbinu, omogućujući joj da se ubrza do visokih obrtaja; ostatak energije gasova se ispoljava kao rad sile potiska; energija koju razvija turbinu se prenosi preko osovine na kompresor. I tako se taj započeti proces nastavlja kontinuelno.

Dodatno sagorevanje. Kada postoji zahtev da turbomlazni motor treba da razvije dopunski, kratkotrajni, veliki potisak, onda se koristi tzv. dodatno sagorevanje. To bi bilo potrebno na primer za ubrzanje prilikom poletanja ili penjanja.



Sl. 85 — Sklop mlaznika turbomlaznog motora



Sl. 86 — Sprovodni aparat i obrtno kolo turbine

Dodatni potisak se može ostvariti sagorevanjem goriva u mlaznoj cevi. Onaj vazduh koji je služio za hlađenje komora sagorevanja može da bude nosilac sagorevanja dodatnog goriva. Dodatni potisak je velik, ali ukupni stepen iskorišćenja turbomlaznog motora postaje manji zbog velikog porasta specifične potrošnje. Osnovni tip konstrukcije turbomlaznog motora sa dopunskim sagorevanjem je prikazan na slici 87. Pada u oči postojanje mlaznika u obliku čeljusti, koji omogućuju prilagođavanje izlaznog otvora pri promeni protočnih karakteristika koje nastaju kada se prelazi na dodatno sagorevanje. Dodatnim sagorevanjem može se postići da se poveća potisak oko 30% pri poletanju, a oko 70 do 120% pri brzini leta od oko 1000 km/h.

Protočnomlazni motori su ograničeni u svom radu zavisnošću od okolnog atmosferskog vazduha. Raketni motori ne podležu ovakvom ograničenju.

RAKETNI MOTORI

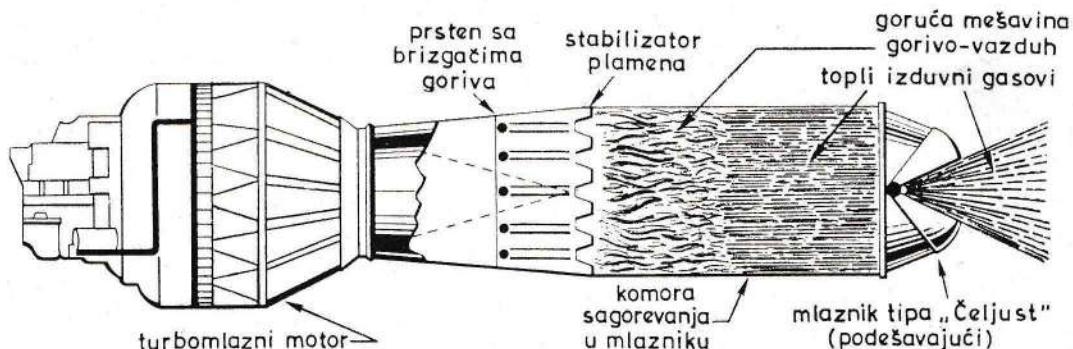
Raketu karakteriše to da svu potrebnu masu i energiju za pogon nosi u sebi.

U raketnom motoru se koristi hemijska reakcija koja oslobađa velike količine energije. Rezultat toga je mogućnost postizanja većih temperatura, viših radnih pritisaka i većeg potiska nego u mlaznim motorima o kojima je upravo bilo reči. Pošto se radi o velikom pritisku u komori sagorevanja raketnog motora, neophodno je da se upotrebi konvergentno-divergentan (De Lavalovov) mlaznik, kako bi se u potpunosti iskoristila energija gasova.

Neki osnovni principi koji su važili i za ostale mlazne motore važe i za raketne.

PODELA RAKETNIH MOTORA

Već u zavisnosti od fizičkog stanja upotrebljene pogonske materije, govori se o čvrstim i tečnim raketama.



Sl. 87 — Turbomlazni motor sa dodatnim sagorevanjem

Rakete sa čvrstom pogonskom materijom karakteriše kratko vreme gorenja, jednostavna konstrukcija, veća težina i nemogućnost da im se rad komandovan prekida i ponovo uspostavlja. Prema tome, njihova pripremna upotreba je kao pomoćno sredstvo-buster, ili kao pogon velikobrizinskih projektila sa kratkim radom.

Raketni motori sa tečnim pogonskim materijama mogu raditi duže vreme a i rad im se može po volji prekidati i ponovo aktivirati. Po konstrukciji takve rakete su komplikovanije. Ovaj sistem se široko upotrebljava za pogon raketa velikog dometa. Primeri bi za to bili rakete V-2 i »Viking«.

RAKETE SA ČVRSTIM POGONSKIM MATERIJAMA

Rakete ovog tipa se sastoje od čvrste pogonske materije, komore sagorevanja, pripale i mlaznika. Jedan tipični raketni motor ovog tipa prikazan je na slici 88, uz naznačenje sastavnih delova.

O vrstama čvrstih pogonskih materija bilo je već ranije govora u ovoj glavi.

Komora sagorevanja u čvrstim raketnim motorima ima dve uloge. Prvo, ona služi kao mesto za smeštaj pogonske materije i, drugo, ona je prostor u kome se odvija sagorevanje. Već u zavisnosti od oblika punjenja, u komori se može nalaziti uređaj za držanje punjenja u odgovarajućem položaju, »dijafragma« za hantanje čvrstih delića koja sprečava začepljenje grla mlaznika i »rezonantna šipka« za apsorbovanje vibracija.

Pripala se sastoji od malog punjenja crnog baruta ili od neke druge materije kaja se lako pali bilo varnicom bilo usijanom žicom i pri-

tom razvija dovoljno visoku temperaturu za paljenje glavnog pogonskog punjenja.

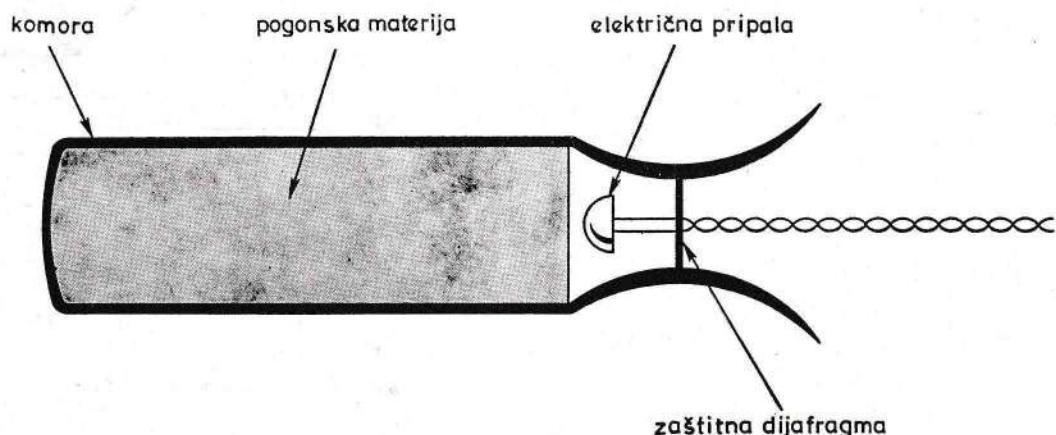
Mlaznik ima istu funkciju kao i u drugim mlaznim motorima. Raketni motori sa čvrstim pogonskim materijama se dele prema tome kakvo punjenje koriste na motore sa ograničenim gorenjem i motore sa neograničenim gorenjem. Karakteristike ova dva tipa su već bile razmatrane kada je ranije bilo reči o čvrstim pogonskim materijama. Zahvaljujući karakteristikama čvrstih pogonskih materija, raketni motori ovog tipa mogu se uskladištiti napunjene.

Rad raketnog motora sa čvrstim punjenjem je jednostavan. Paljenjem sa bezbedne daljine motor započinje rad. U tim prvim trenucima upaljač biva izduvan napolje i motor nastavlja rad sve do momenta kada punjenje bude potrošeno.

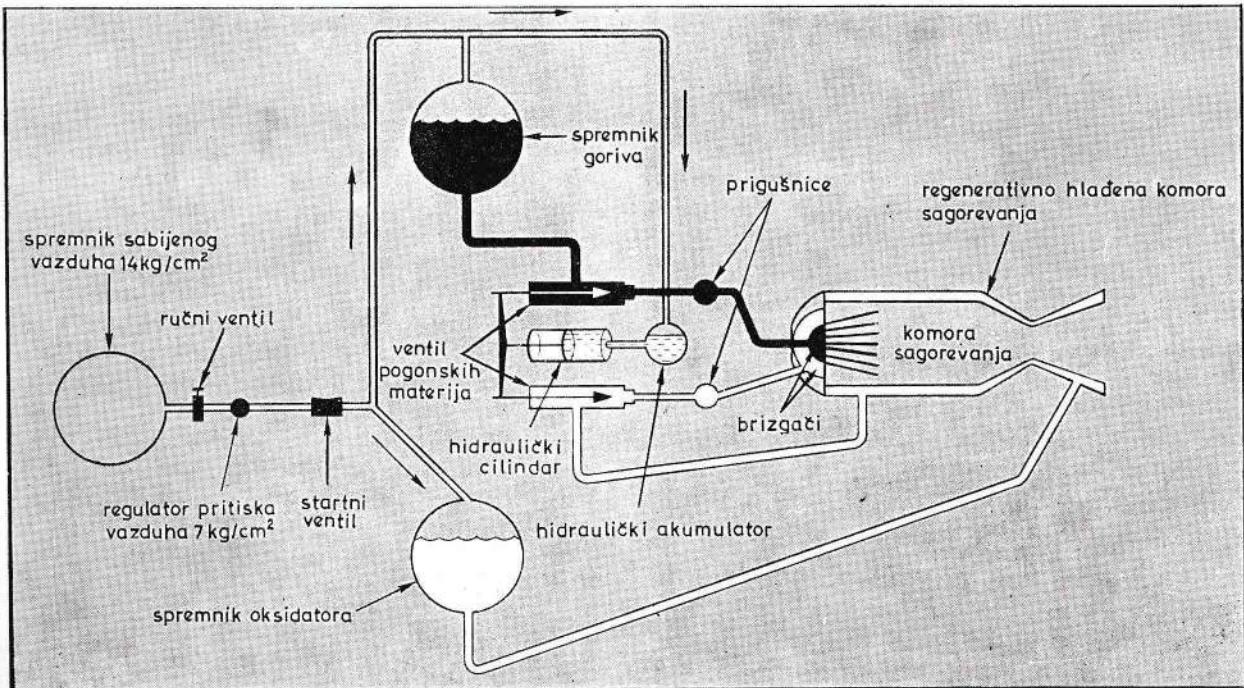
Hlađenje motora ne predstavlja problem pošto mu rad kratko traje. Jedan od metoda koji rešava problem hlađenja je upotreba šupljeg ograničenog punjenja. Tada se sagorevanje obavlja po unutrašnjoj površini zida, tako da sam zid punjenja služi kao topotni izolator koji sprečava da usijani gasovi dodirnu metalne zidove motora. Ovakav efekat hlađenja se smanjuje stanjivanjem zida punjenja tokom gorenja. Mlaznik je obično masivan zbog visokih temperatura kojima je izložen.

RAKETNI MOTORI SA TEČNIM POGONSKIM MATERIJAMA

Glavni sastavni delovi motora ovog tipa su: pogonske materije, sistem napajanja, komora sagorevanja, pripala (ako pogonska materija nije hipergolična) i mlaznik. Ovde bi jedino još trebalo objasniti sistem napajanja.



Sl. 88 — Sastavni delovi raketnog motora sa čvrstom pogonskom materijama



Sl. 89 — Sistem napajanja pod pritiskom raketnog motora sa tečnim pogonskim materijama

Sistemi napajanja. Najčešće se koriste dva sistema napajanja: *napajanje pod pritiskom* i *napajanje pumpama*.

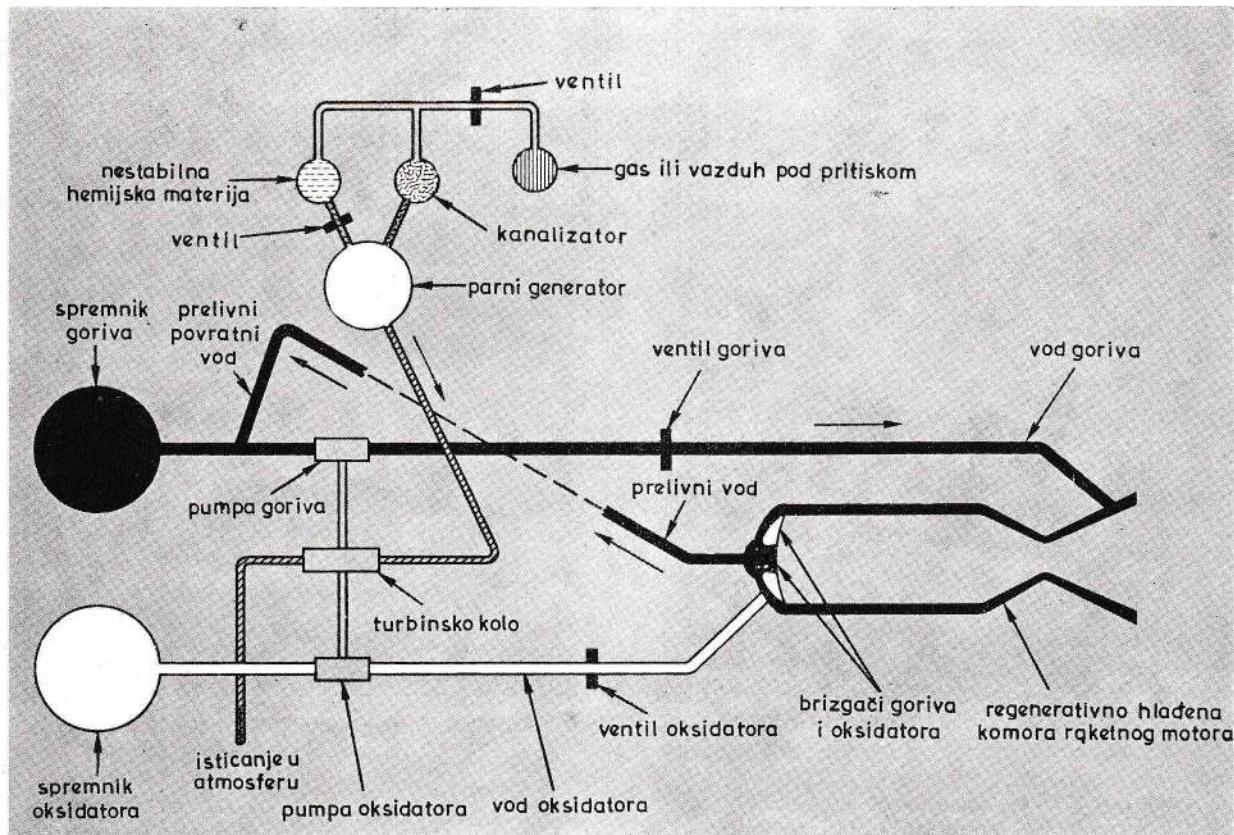
Sistemi napajanja pod pritiskom. Mogu se razlikovati dve grupe ovih sistema. Kod prve se vazduh ili neki drugi gas nosi sabijen u odgovarajućem spremniku. Taj gas se pod kontrolisanim pritiskom uvodi u rezervoare tečnih pogonskih materija, potiskujući ih u komoru sagorevanja. Kod druge grupe u raketni se nosi odgovarajuća materija koja stvara gas visokog pritiska za sve vreme rada motora. Primer ovačke materije bi bio vodonik-superoksid koji se, prolaskom kroz katalizator, napr. kalijum-permanganat, razlaže na gasove visokog pritiska. Ovi gasovi se uvode u spremnike pogonskih materija.

Da bi bilo koji od dva pomenuta sistema radio pravilno, potrebna je i dodatna oprema koja se sastoji od *ventila*, *regulatora*, *cevovoda*, *brizgača* i dr.

Na slici 89 prikazana je međusobna veza pojedinih sastavnih delova kod sistema napajanja pod pritiskom. Sabijeni vazduh je uskladišten pod 140 atmosfера. *Ručni ventil* se otvara neposredno pred start. Ova radnja čini da se sistem stavi pod pritisak sve do startnog ventila. *Regulator vazdušnog pritiska* obara pritisak vazduha do željene veličine, već prema potrebi komponenata sistema, u ovom slučaju do 7 at.

Pošto sve osoblje napusti neposredno ugrožen prostor, daljinskom električnom komandom se aktivira *startni ventil*. Vazduh pod pritiskom od 7 at ulazi u spremnike pogonskih materija i stavlja ih pod pritisak. Ovi rezervoari moraju biti načinjeni od materijala otpornog na te tečnosti. Pored toga, rezervoari moraju biti dovoljno čvrsti da izdrže unutrašnji pritisak. U isto vreme kada su rezervoari stavljeni pod pritisak, vazduh ulazi u *hidraulički akumulator* i u njemu stavlja pod pritisak ulje. Dejstvom pritiska ulja pomera se klip u hidrauličkom cilindru koji otvara *ventile pogonskih materija*. Rezultat toga je da gorivo i oksidator počnu oticati kroz *prigušnice* koje regulišu protok, tako da se održava pravilan odnos mešavine. Ove prigušnice imaju takav oblik da jednostavno sužavaju protočni presek, a podešene su prethodnim hidrauličkim probama. U nekim slučajevima sami *brizgači* sužavaju protočni presek, tako da prigušnice nisu potrebne. Brizgači raspršuju pogonske materije. Na slici se može zapaziti da oksidator prvo prolazi među zidove komore sagorevanja i tek onda ulazi u ventil. Hlađenje komore ostvareno na ovaj način naziva se *regenerativnim*.

Sistem napajanja pod pritiskom se upotrebljava kada su mali i količina pogonskih materija i protok. Za velike količine pogonskih materija i velike protoke neophodan je veliki



Sl. 90 — Tipičan raketni motor sa sistemom napajanja turbinapumpa

spremnik vazduha sabijenog do visokog pritiska, pa dakle i veliki prostor i povećana težina što je nepovoljno za jednu raketu.

Sistemi napajanja pumpama. Ovakvi sistemi se koriste za rakete koje treba da nose velike količine pogonskih materija i za motore velike potrošnje. U takvim slučajevima pogonske materije se potiskuju pumpama koje dobijaju pogon od odgovarajuće turbine. Ako se snaga za pokretanje turbine dobija od energije gasova nastalih reakcijom odgovarajućih nošenih hemikalija, onda se govori o sistemu turbina-pumpa. Ako se ta energija dobija od izduvnih gasova raketnog motora, onda se naziva *turbopumpnim sistemom*. Na slici 90 prikazani su sastavni delovi raketnog motora koji koriste sistem napajanja turbinapumpa.

Nošeni sabijeni vazduh stavlja pod pritisak dva spremnika u kojima su smeštene materije koje treba da omoguće stvaranje pare. U komori gasgeneratora razlažu se nestabilne materije dejstvom katalizatora, usled čega se stvara para visokog pritiska. Ova para se odvodi do turbine koja pokreće pumpe pogonskih

materija. Na taj način se gorivo i oksidator potiskuju kroz cevovode i kroz ventile sa daljinskim upravljanjem u komoru sagorevanja. Gorivo, pre nego što se ubrizga, vrši ulogu hladiva. Višak goriva, koji ne prolazi kroz brizgače, vraća se kroz prelivni vod.

Sistem sa turbopumpom ne upotrebljava generator pare, nego gas odvaja od osnovnog mlaza raketnog motora, pri čemu se turbina stavlja u neposrednu blizinu mlaznika. Odgovarajućim zupčastim i osovinskim prenosom se energija prenosi na pumpe.

Sistem hlađenja raketnih motora. Zbog velike količine oslobođene energije u komori raketnog motora neophodno je hladiti unutrašnji zid komore i mlaznik. Ako se motor za duže vreme ne bi hladio, oslabila bi konstrukcija i pregoreli kritični delovi.

Često se upotrebljava *regenerativni metod hlađenja* koji je prikazan na dve prethodne slike. U tom slučaju se gorivo ili oksidator, pre ubrizgavanja u komoru, vodi među zidove komore, od zadnje prema prednjoj strani. Komora se hlađi na taj način što toplotu sa zidova

apsorbuje gorivo ili oksidator. Ta toplota nije izgubljena nego se vraća u sistem.

Hlađenje filmom se sastoji u ubrizgavanju malom brzinom goriva ili oksidatora, ili nekog drugog fluida, u komoru sagorevanja na kritičnim mestima. Ubrizgana tečnost stvara jedan zaštitni film na unutrašnjem zidu. Ovaj film apsorbuje toplotu isparavanjem.

Kod sistema koji upotrebljava hlađenje tzv. *znojenjem* neophodno je da komora bude napravljena od poroznog materijala. Hladivo prolazi kroz pore apsorbujući toplotu isparavanjem, kao u slučaju hlađenja filmom. Ali, ovaj metod negativno se odražava na konstrukciju motora. Na primer, poroznim materijalom smanjuje se čvrstoća konstrukcije. Ili, zbog neravnomerne poroznosti i promenljivog pritiska u komori dolazi do nekontrolisanog protoka hladiva.

Najčešće se upotrebljava regenerativno hlađenje i hlađenje filmom, ili obe vrste hlađenja kombinovano.

Pošto je raketna tehnika relativno mlada, može se očekivati da će raketni motori biti usavršeni u skoroj budućnosti, paralelno sa poboljšanjem stepena dejstva. To ne znači da će današnji motori biti napušteni. Verovatno je da će osnovne komponente današnjih motora naći svoje mesto i u budućim motorima.

ATOMSKA ENERGIJA ZA POGON PROJEKTILA

U toku su ozbiljne studije u smislu upotrebe atomske energije za pogon projektila. Takva pogonska grupa bi umnogome povećala brzinu i trajanje leta. Dosadašnji pogonski sistemi bi u tom slučaju bili napušteni kao osnovni pogon. Međutim, oni bi služili kao pomoćno sredstvo — buster pri polaganju i ubrzavanju projektila tokom prvih nekoliko milja njegovog leta, sa ciljem da se spriči radioaktivno trovanje neposredne okoline mesta lansiranja od strane atomskog motora.

Jedna od glavnih prednosti upotrebe atomske energije leži u praktično neiscrpljivom izvoru toplote. Ova osobina naročito dolazi do izražaja kod raketnog pogona koji danas ima manu da troši velike količine goriva. Kod svih projektila koji bi imali atomski pogon potrebna količina atomskog goriva bi bila približno konstantna. Količina potrebna za započinjanje reakcije bi bila dovoljna da tu reakciju održava. Međutim, u projektilu se mora nositi neka druga masa koja će biti u stanju da apsorbuje atomsku energiju i da bude ubrzana kako bi se stvorio potisak.

Glavni problemi pred kojima se nalaze konstruktori odnose se na rešavanje pitanja zaštite delova projektila i instrumenata od radijacije i na razvoj kompaktnog atomskog motora koji bi bio praktičan za pogon projektila.

Potrebno je još mnoga godina tehničkog razvoja pre nego što atomska energija može biti korišćena za pogon projektila i raketa. Međutim, izgledi su ohrabrujući. Problem dometa u budućnosti više neće postojati, jer će biti na raspoloženju velike snage.

NAČINI LANSIRANJA PROJEKTILA

Do sada su opisani razni tipovi motora, a sada će biti govora o nekim problemima u vezi sa lansiranjem projektila.

POMOĆNI POGON — BUSTER

Potisak koji razvija osnovni motor najčešće nije dovoljno velik za poletanje. Ovo naročito važi za pulzirajućem lazne i nabojnom lazne motore. Dakle, nekim letelicama mora biti saopštena početna brzina da bi se osigurao ili pravilan rad, ili potreban potisak, ili aerodinamička stabilnost tokom poletanja. Da bi se zadovoljili različiti zahtevi u vezi sa tim, osnovnoj pogonskoj grupi se dodaje pomoćna grupa — buster.

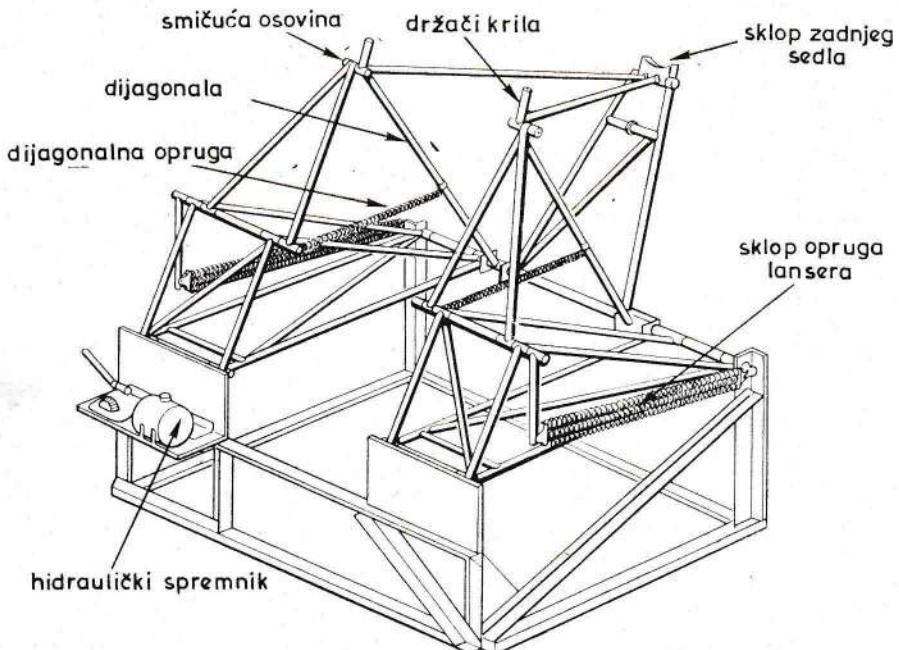
Buster je, dakle, pomoćni pogon koji daje projektilu dodatni potisak tokom poletanja. Uglavnom, on se sastoji od raketnog motora sa čvrstom pogonskom materijom i odgovarajuće opreme. Takvi busteri su pogodni za ovu svrhu jer su prosti po konstrukciji, a raspolažu velikim potiskom za kratko vreme. Ponekad busteri imaju i stabilizatorske površine. Obično se buster direktno vezuje za projektil.

Postoje slučajevi kada je ovaj pomoćni pogonski sistem uključen u konstrukciju lansirnog uređaja, pri čemu ceo sistem nosi naziv »katapult«.

SPECIJALNI LANSERI

Pre nego što se izvrši lansiranje, projektil se mora, uz pomoć neke konstrukcije, dovesti u željeni položaj. Ta konstrukcija se naziva *lanserom*. U osnovi, lanser je mehanička konstrukcija koja nosi i pridržava projektil tako da se projektilu osigurava odgovarajuće kretanje u početnoj fazi leta.

Karakteristike koje treba da ispunjava jedan lanser su: *pokretljivost*, *lakoća upravljanja* i *broj lansiranja* u jedinici vremena. Stepen

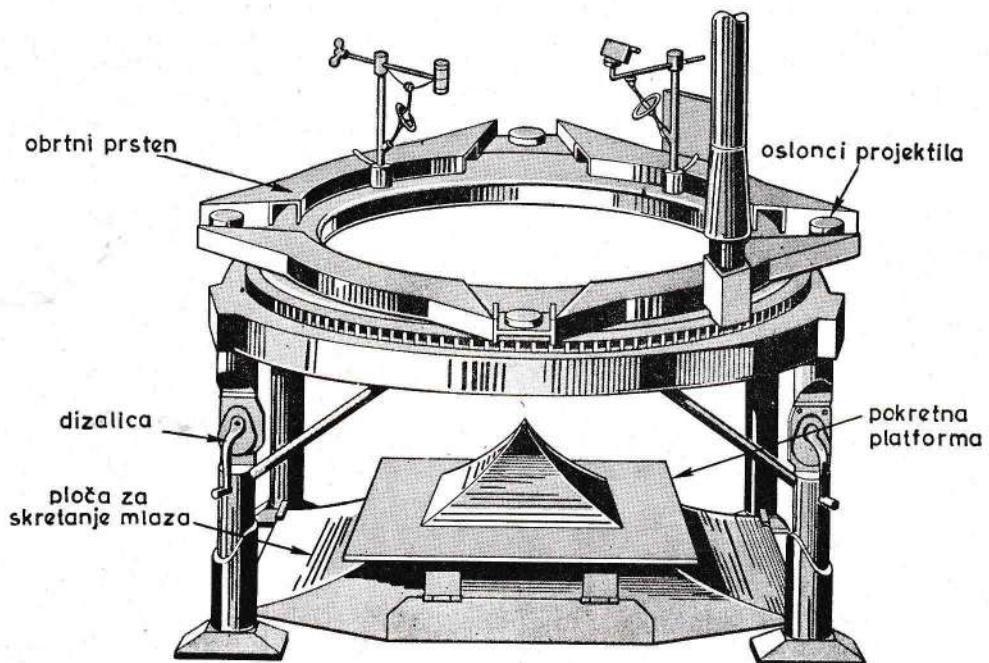


Sl. 91 — Lanser nulte dužine

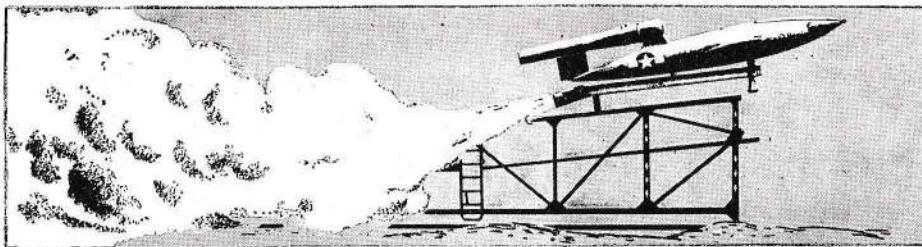
važnosti ovih i drugih karakteristika zavisi od tipa projektila i predviđene taktičke upotrebe lansera.

Lanser nulte dužine. Lanser ovog tipa ne vodi projektil u prvoj fazi leta, nego ga na-

kon delića sekunde oslobađa, pri čemu prestaje svaki fizički kontakt među njima. Da bi za tako kratko vreme projektil dobio dovoljno veliku brzinu, neophodno je da ima buster velike snage.



Sl. 92 — Lanser sa platformom



Sl. 93 — Lancer u obliku rampe

Na slici 91 je prikazan lancer nulte dužine. Krila projektila se na njemu pridržavaju pomoću dva odgovarajuća držaća, dok je njegov zadnji deo (rep) smešten u odgovarajuće sedlo. Lancer se postavlja pod određeni ugao uz pomoć hidrauličnog sistema. Sa strane gledano, lancer izgleda kao paralelogram koji je ukrućen dijagonalnim štapotima, vezanim osovinama za koren držača krila. Kada potisak projektila i bustera postane dovoljan za poletanje, pomenute osovine se prekidaju, dozvoljavaju paralelogramu da se skupi, čime se repu projektila i bustera omogućuje da prođu. Buster se automatski otkačinje od projektila kada mu izgori punjenje.

Lancer sa platformom. Lancer ovog tipa drži projektil u vertikalnom položaju. On se upotrebljava za dalekometne projektile tipa V-2. Busteri u ovim slučajevima nisu neophodni jer osnovni raketni motor razvija potisak dovoljno velik za poletanje. Kretanje projektila u prvoj fazi poletanja, dok mu je brzina mala i aerodinamičke površine neaktivne, kontroliše se odgovarajućim automatskim uređajem.

Lancer sa platformom je jednostavan po konstrukciji, a u mogućnosti je da vrši pomeranje u granicama od nekoliko stepeni. Slika 92 prikazuje lancer ovog tipa. Ugrađene dizalice omogućuju podizanje, spuštanje i naginjanje stola. Za opsluživanje projektila tokom pripremnog perioda služi pokretna platforma koja se sklanja pred lansiranje. Ispod stola se nalazi deflektor mlaza koji lomi mlaz sprečavajući kopanje podloge prilikom poletanja.

Lancer u obliku rampe. Lancer ovog tipa se sastoji od dve šine postavljene na jednoj rampi, koja može biti ili nepokretna ili pokretna do određenog ugla elevacije. Na slici 93 je prikazan lancer u obliku rampe sa postavljenom letelicom. Zato što su glomazni, lanseri ovog tipa su dosta nepokretljivi. Lancer za V-1 je bio 45 metara dug sa uzdignutim gornjim krajem za

4,8 metara. Tokom razvoja na ovakvim lanserima, je upotrebljavan ceo niz pomoćnih pogoña. U nekim slučajevima za donji deo letelice su pričvršćeni klizači i raketni buster sa čvrstim pogonskim materijama. Letelica se ubrzava duž šine do brzine od oko 320 km/h, na kraju rampe. Buster otpada posle oko 120 metara penjanja.

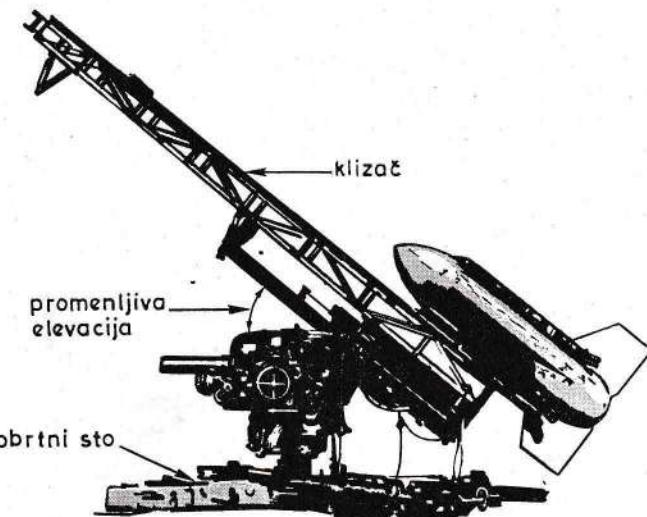
Vodena para visokog pritiska takođe je korišćena kao sredstvo za pomoćni potisak. Ispod šina, celom njihovom dužinom, je postavljena cevasta komora. Letelica je bila vezana za klip koji se nalazio u pomenutoj cevi. Vodena para visokog pritiska, stvorena razlaganjem vodonika-superoksida, potiskuje klip koji ubrzava letelicu duž šina.

Drugi metod za razvijanje pomoćnog potiska se sastojao u korišćenju barutnog punjenja postavljenog na stranama lansera. I ovde uređaj za stvaranje potiska ostaje na lanseru pošto letelica poleti.

Lancer sa jednim klizačem. Ovakav lancer je prikazan na slici 94. On može da ostvari elevaciju od 90 stepeni i rotaciju od 360 stepeni. To je idealan lancer za projektile zemlja-vazduh zato što je pokretljiv i što može da obavi veći broj lansiranja za kratko vreme. Zbog kratkog klizača upotreba mu je ograničena za projektile velikog potiska. Veza između projektila i klizača se ostvaruje pomoću konstrukcije klizača u obliku lastinog repa.

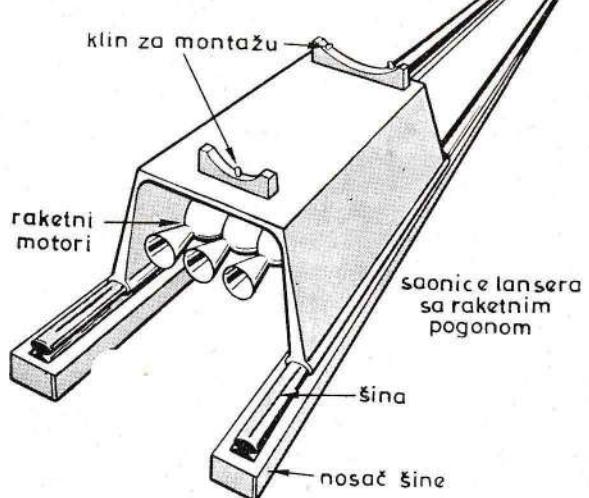
Jedan drugi oblik pomenutog lansera koristi umesto klizača nažljebljenu gredu, pri čemu se na donjoj strani projektila postavlja nazubljen točak, čime se smanjuje trenje i ostvaruje dobra veza lansera i projektila.

Lancer u obliku tornja. Na slici 95 se može videti lancer ovog tipa. Konstrukcija mu je rešetkasta, a omogućuje da se projektil za vreme lansiranja drži u vertikalnom položaju, ili u položaju koji je približan vertikalnom. Neki ovakvi lanseri se mogu naginjati za nekoliko ste-



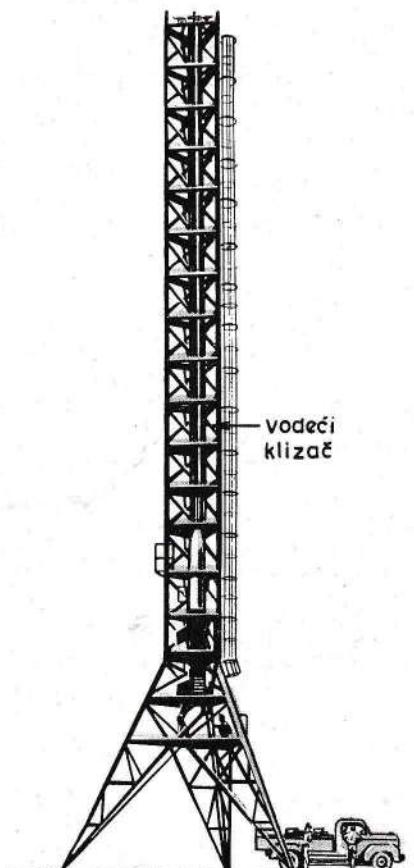
Monorail launcher

Sl. 94 — Lancer sa jednim klizačem



Sl. 96 — Lancer sa saonicama

peni, kako bi se kompenzirao uticaj vетra ili drugih faktora na željenu putanju. Oni mogu biti dovoljno visoki da bi se projektilu omogu-



Sl. 95 — Lancer u obliku tornja

ćilo da ostvari brzinu potrebnu za postizanje aerodinamičkog stabiliteta pre nego što ovaj napusti toranj. Lanser u obliku tornja najčešće se koristi za sondažne rakete koje slede balističku putanju.

Lancer na saonicama. Lanser ovog tipa koristi saonice koje dobijaju pogon od raketnih motora sa čvrstim punjenjem. Projektil koji treba lansirati postavlja se na te saonice, koje se kreću po dvama klizačima koji su vrlo slični železničkim šinama. Posle lansiranja projektila, saonice se zaustavljaju vodenom kočnicom, nakon čega se vraćaju na startno mesto.

Na slici 96 prikazan je jedan ovakav lanser, odnosno saonica, klizači i pogonsko sredstvo. Izostavljeni su detalji koji bi smetali jasnoći predstave. Klizači moraju biti vanredno ravni, a dugački kilometar i više. Uređaj za kočenje nije prikazan jer je prilično komplikovan.

LANSIRANJE SA VIŠE STEPENA

Sistem sa više stepena je prikazan na slici 97. Kao što se vidi, on se sastoji od više odvojenih stepena projektila od kojih svaki ima svoj sopstveni pogon. Svaki ovaj deo se naziva »steponom«. U primeru trostopenog sistema lansiranje započinje paljenjem raketnih motora prvog stepena koji ubrzavaju ceo sistem do maksimalne brzine. U tom trenutku odvaja se prvi stepen i automatski pali motor drugog stepena dok se ne postigne druga maksimalna brzina. Tada se odvaja drugi stepen a pali treći stepen koji dalje povećava brzinu. Na ovakav način se mogu postići i veće visine i brzine nego korišćenjem

samo jedinog projektila. Projektil »Vak-korporol« je na taj način bio uspešno lansiran uz pomoć projektila V-2 (dvostepeni projekat »bumper«) i dostigao je visinu od 400 kilometara.

Sa postojećim pogonskim materijama sistem stepenovanja najbolje omogućuje postizanje brzine oslobođanja od Zemlje i čini da vaskonska putovanja postanu stvarnost.

REZIME O RAKETNOM POGONU

Pre nego što se prede na izlaganje o korišćenju fizike u raketnoj tehnici, ukratko će se rezimirati ono što je rečeno u ovoj glavi.

Objašnjeno je da se raketni pogon ostvaruje promenom količine kretanja materije koja se nosi u projektilu i ističe iz njega. Za tu svrhu se koristi sagorevanje ili čvrste pogonske materije (npr. balistita), ili tečne kao mešavina (npr. anilina i nekog od oksidatora).

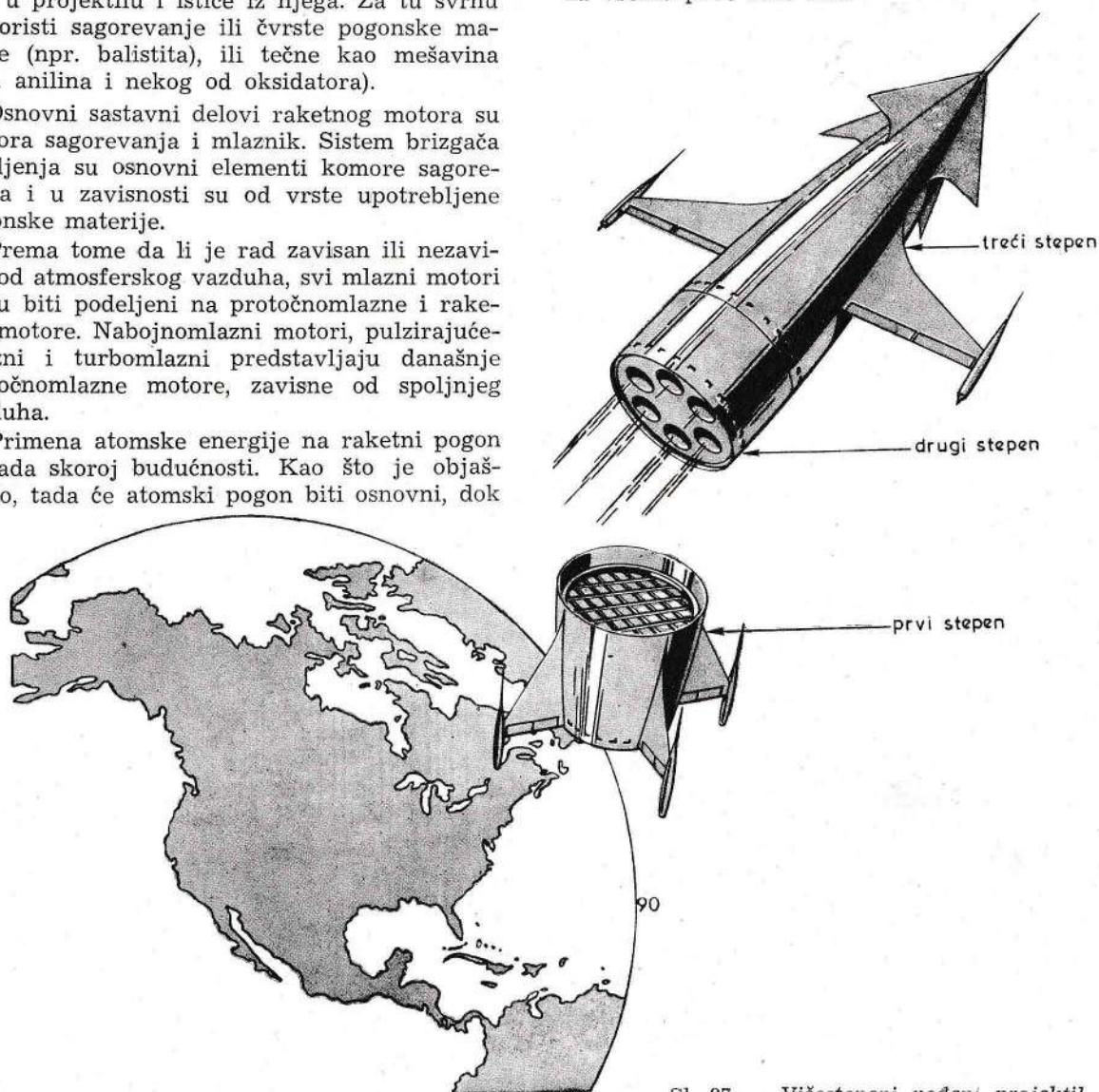
Osnovni sastavni delovi raketnog motora su komora sagorevanja i mlaznik. Sistem brizgača i paljenja su osnovni elementi komore sagorevanja i u zavisnosti su od vrste upotrebljene pogonske materije.

Prema tome da li je rad zavisan ili nezavisan od atmosferskog vazduha, svi mlazni motori mogu biti podeljeni na protočnomlazne i raketne motore. Nabojnomlazni motori, pulzirajuće-mlazni i turbomlazni predstavljaju današnje protočnomlazne motore, zavisne od spoljnog vazduha.

Primena atomske energije na raketni pogon pripada skoroj budućnosti. Kao što je objašnjeno, tada će atomski pogon biti osnovni, dok

će se danas postojeći koristiti kao pomoćni — buster sistemi. Takvim načinom bi se izbeglo trovanje mesta lansiranja od radioaktivnih zračenja. Glavna prednost pri upotrebi atomske energije bi u tom slučaju ležala u praktično neiscrpnom izvoru energije.

Lansiranje projektila predstavlja specijalan problem. U najčešće slučajeva motor projektila ne raspolaže potiskom dovoljnim za poletanje. Isto tako, neki motori, kao nabojnomlazni, traže određenu brzinu da bi mogli da rade. Rešenje ovih problema leži u upotrebi pomoćnih — buster motora, obično raketnih sa čvrstim punjenjem, kao pomoć osnovnim motorima. Lanseri se upotrebljavaju da pridržavaju i vode projektil, tako da se on kreće po željenom pravcu za vreme prve faze leta.



Sl. 97 — Višestepeni vođeni projektil

Principi fizike na kojima se zasniva ustrojstvo vođenih projektila

Oblik projektila i ustrojstvo svih delova koji se upotrebljavaju za njihovu izradu, a tako isto i sistemi koji se koriste za njihovo vođenje i upravljanje, zasnivaju se na osnovnim zakonima i principima fizike.

Funkcija svakog elektronskog ili mehaničkog dela projektila počiva na nekom fizičkom principu ili svojstvu. Mnogi su delovi jednostavni po obliku i vrše samo jednu osnovnu operaciju, drugi mogu funkcionisati istovremeno ili u zajednici s drugim jednostavnim delovima izvršavajući veoma složene operacije, kao što je slučaj sa delovima i sistemima koji se upotrebljavaju za vođenje i upravljanje i u kontrolno-mernoj aparaturi.

Ova glava obrađuje principe fizike koji se primenjuju u izradi projektila i po kojima funkcionišu elektronski i mehanički delovi projektila. Ova glava, takođe, objašnjava kako se kombinuju optički i elektronski principi. Ona govori o tranzistorskoj fizici, a poslednji njen deo ulazi u mnoge pojedinosti iz oblasti modulacije nosećih talasa. Poznavanje materijala koji sadrži ova glava pomaže da se shvate funkcije delova i sistema koji se upotrebljavaju u radu projektila.

NJUTNOVI ZAKONI KRETANJA

Njutnovi zakoni kretanja su karakterističan primer osnovnih zakona fizike na kojima se zasniva rad projektila. Mada čitaocu poznati, oni su toliko važni za proučavanje projektila da ih ovde treba ponoviti.

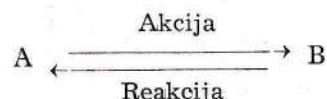
Prvi Njutnov zakon kretanja kaže da »telo u mirovanju ostaje u mirovanju, a telo u kre-

tanju produžava da se kreće istom brzinom duž prave linije sve dok ga kakva neuravnotežena sila ne prinudi da to stanje promeni«.

Drugi Njutnov zakon kaže da »neuravnotežena sila koja deluje na neko telo čini da ono stalno povećava svoju brzinu i da je to ubrzanje direktno proporcionalno jačini sile, a obrnuto srazmerno masi tela«. Formula za ovaj zakon

glasi: $a = \frac{F}{m}$ gde je a — ubrzanje tela, F — neuravnotežena sila koja deluje na telo, a m — masa tela.

Treći Njutnov zakon kaže da »za svaku akciju postoji jednaka ali suprotna reakcija, i da se obe one nalaze duž iste prave linije«. Sledеća shema pomaže da se značenje ovog trećeg zakona učini jasnjim:



U definiciji ovog zakona izraz »akcija« odnosi se na silu kojom jedno telo deluje na drugo, a »reakcija« na silu kojom drugo telo deluje na prvo.

Izloženi principi nalaze primenu u ustrojstvu i radu projektila. Da bismo upravljali letom projektila, moramo upotrebljavati sprave koje će delovati zajedno sa prirodnim silama koje su prisutne duž putanje projektila, ili protiv tih sila.

U nekim slučajevima moguće je postići da jedna nepoželjna sila deluje protiv druge nepoželjne sile da bi se na taj način neutralisala

ili poništo njen uticaj. Takve radnje mogu postati vrlo složene, što zavisi od broja prisutnih sila koje deluju jedna na drugu. Kada ima mnogo takvih sila, potrebni su veoma složeni sistemi, kao što su oni koji se upotrebljavaju u navigaciji projektila. Među sile s kojima sistemi za navigaciju moraju da računaju, spadaju gravitacija, inercija, ubrzanje, Koriolisov efekat i magnetizam.

FIZIČKI PRINCIPI I SVOJSTVA NA KOJIMA SE ZASNIVA RAD PROJEKТИLA

Da bi se potpuno razumele funkcije osnovnih delova i sistema koji se upotrebljavaju za rad projektila, potrebne su još neke informacije o fizičkim principima i svojstvima na kojima se te funkcije zasnivaju. Potrebno je da se poznaju takvi pojmovi, kao što su inercija, gravitacija, kružno kretanje, centrifugalna i centripetalna sila, obrtno kretanje, poluprečnik inercije i precesiono kretanje.

O ovim i drugim terminima govori se u sledećim odeljcima. Nemoguće je, a nije ni potrebno, da se ovde potpuno analizira njihovo značenje. Umesto toga, daće se samo uzajamne veze između raznih fizičkih principa i svojstava na koje se termini odnose. Potrebno je da se znaju te uzajamne veze, tako da se mogu lakše uočiti one među njima koje se mogu primeniti u osnovnim sklopovim i radnim sistemima projektila.

INERCIJA

Bez obzira na specifičnost namene ili ustrojstva nekog dela projektila, a isto tako i bez obzira na to da li će taj deo biti elektronski ili čisto mehanički, njegov rad zavisi od jednog fizičkog svojstva ili od više njih. Jedno od tih svojstava koje je karakteristično za materiju uopšte jeste inercija.

Inercija se definiše kao svojstvo materije kojim ona teži da ostane u mirovanju, ili, ako je u pokretu, da nastavi da se kreće istim pravcem sve dok na nju ne počne da deluje neka spoljna sila. Ova definicija formulisana je u prvom Njutnovom zakonu kretanja. Inercija se može shvatiti i kao otpor koji telo pruža svakoj promeni kretanja; to jest, da bi se telu dalo linijsko ubrzanje, potrebna je neka neuravnotežena sila.

Da bi se razumelo svojstvo inercije, potrebno je da se pojma *masa* definiše šire, a ne samo kao količina materije. Masa se može shvatiti kao svojstvo zbog kojeg predmet raspolaže inercijom.

Momenat inercije. Težnja ili mera težnje da se proizvede obrtanje oko osovine naziva se *momenat inercije* (I) tela dobija se kada se masa neke čestice tela pomnoži sa kvadratom odstojanja te čestice od osovine obrtanja, pa se dobijene vrednosti saberi. Drugim rečima, momenat inercije određuju mase čestica iz kojih je telo sastavljeno i kvadrati pojedinih poluprečnika koji se pružaju između tih čestica i osovine. Neke korisne vrednosti momenta inercije raznih geometrijskih oblika date su na slici 98.

Momenat inercije često se definiše pomoću usredsređene mase tela i jednog jedinog fiktivnog poluprečnika zvanog *poluprečnik inercije*. Poluprečnik inercije tela definiše se kao odstojanje od osovine obrtanja tela do tačke za koju se može smatrati da je u njoj koncentrisana celokupna masa tela bez promene njegovog momenta inercije.

BRZINA

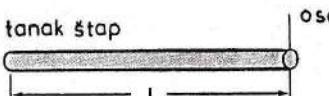
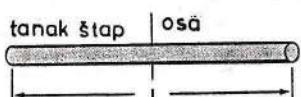
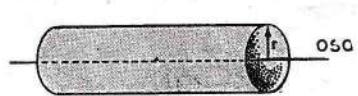
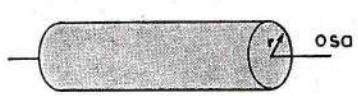
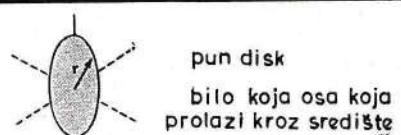
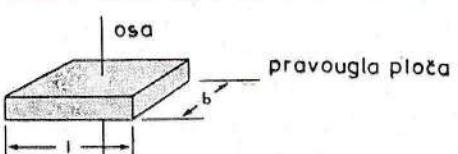
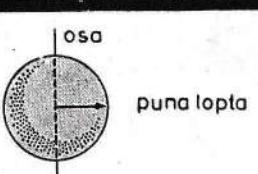
Poznato je da vektor brzine predstavlja brzinu i određen pravac kretanja. Vektor može biti konstantan i promenljiv. Ako se vektor brzine menja, promena se može sastojati u promeni brzine, ili u promeni pravca, ili u promeni i jednog i drugog. Kad se ostvaruje promena pravca, onda se za opis kretanja upotrebljava termin ugaona brzina. Pod ovim se podrazumeva brzina kojom telo menja pravac.

Ugaona brzina tela koje se obrće može se predstaviti akcijalnom linijom određene dužine, koja pokazuje brojnu vrednost brzine.

Pravac vektora, kao što je prikazano na slici 99, predstavlja pravac u kojem bi se premetao običan zavrtanj sa zavojem u desnu stranu ako bi se okretao u pravcu u kojem se telo (točak) obrće.

Kad se telu koje se obrće da dodatna ugaona brzina oko iste osovine, rezultirajuća brzina biće algebarski zbir te i ranije brzine. Na primer, ako se telu koje se obrće brzinom od 10 radijana u sekundi u pravcu kretanja kazaljke na satu da dodatna ugaona brzina od 2 radijana u sekundi u pravcu koji je suprotan pravcu kretanja kazaljke na satu, rezultirajuća brzina obrtanja oko iste osovine biće 8 radijana u sekundi u pravcu kretanja kazaljke na satu. Ali ako se dodata brzina odnosi na drugu osovinu, a ne na onu oko koje se telo dotele obrтало, rezultirajuća brzina iznalazi se sabiranjem vektora.

Radijani su sredstvo za merenje uglova zasnovano na relativnim dimenzijama isečka kruga. Radijani pokazuju odnos dužine luka prema poluprečniku.

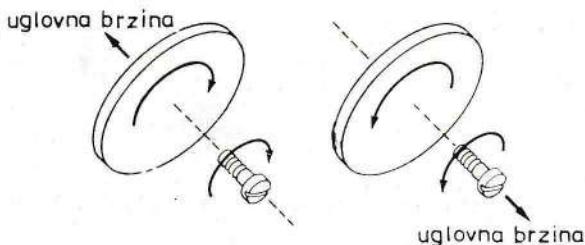
OBLIK	M	
tanak štap mase / M / i dužine / l / u odnosu na poprečnu osu koja prolazi kroz kraj štapa	$\frac{Ml^2}{3}$	 <p>tanak štap osa</p>
isto, ali u odnosu na poprečnu osu koja prolazi kroz sredinu štapa	$\frac{Ml^2}{12}$	 <p>tanak štap osa</p>
šupalj cilindar/s tankim zidovima/ mase / M /, poluprečnika / r / i bilo koje dužine u odnosu na sopstvenu osu	Mr^2	 <p>šupalj cilindar osa</p>
pun cilindar ili disk mase / M /, poluprečnika / r / i bilo koje dužine u odnosu na sopstvenu osu	$\frac{Mr^2}{2}$	 <p>pun cilindar osa</p>
pun disk mase / M /, poluprečnika / r / u odnosu na bilo koji prečnik	$\frac{Mr^2}{4}$	 <p>pun disk bilo koji osa koja prolazi kroz središte</p>
pravougaona ploča mase / M /, dužine / l /, i širine / b / u odnosu na osu koja prolazi kroz njen centar, a i pravno na b i l	$M \frac{b^2 + l^2}{12}$	 <p>pravougaona ploča osa</p>
puna lopta mase / M / i poluprečnika / r / u odnosu na bilo koji prečnik	$\frac{2Mr^2}{5}$	 <p>puna lopta osa</p>

Sl. 98 — Momenți inercije raznih geometrijskih oblika

UBRZANJE

Ubrzanje je promena brzine u jedinici vremena. Ono predstavlja kretanje pri kojem se brzina menja od tačke do tačke.

Kad se brzina mase koja se kreće pravom linijom menja za istu veličinu u istim vremenskim razmacima, kaže se da je ubrzanje stalno, a kretanje *jednako ubrzano*.



Sl. 99 — Ugaona brzina kao vektor

Tela koja se kreću retko kad pokazuju stalno ubrzanje; no telo koje slobodno pada u vakumu blizu Zemljine površine primer je jednako ubrzanog kretanja. Opit je pokazao da ovo stalno ubrzanje Zemljine teže iznosi $9,81 \text{ m/s}^2$. U fizičkim formulama ono se označava slovom g .

Kad ubrzanje nije stalno, njegova prosečna veličina može se izraziti jednačinom:

$$a = \frac{V_f - V_o}{t - t_0}$$

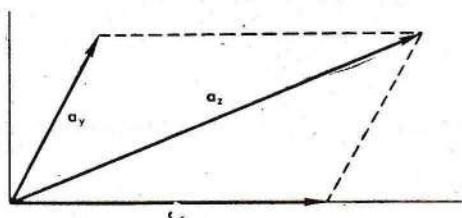
gde je V_f = krajnja brzina.

V_o = početna brzina,

$t - t_0$ = vremenski razmak u toku kojeg se brzina promenila od V_o do V_f .

Jedinice ubrzanja zavise od jedinice brzine i jedinice vremena u toku kojeg se brzina menja.

Na osnovu gornje jednačine može se reći da je ubrzanje jednako razlici dvaju vektora (brzina) podeljenoj skalarnom količinom (vremenom) i da je, prema tome, vektorska količina, koja se može odrediti kao rezultanta slaganja vektora dobro poznatim metodom paralelograma. Na primer, ako neka masa dobija ubrzanja a_x i a_y , rezultirajuće ubrzanje a_z može se dobiti na način koji je prikazan na slici 100. Isprekidane linije



Sl. 100 — Vektorska rezultanta dvaju ubrzanja

povučene su duž pravaca koji su naspramni i paralelni vektorima a_x i a_y . Tačka u kojoj se isprekidane linije sekut određuje rezultirajuće ubrzanje ili rezultantu ubrzanja.

Potrebno je učiniti da ubrzanje nije vremenska promena brzine; ono je vremenska promena vektora brzine. Masa koja se kreće konstantnom brzinom po krugu kreće se ubrzano uprkos činjenice da je vremenska promena njene brzine jednaka nuli. Vektor brzine ne prestano se menja, jer se menja pravac kretanja. Prema tome, vremenska promena vektora brzine nije jednaka nuli. Takvo ubrzanje naziva se normalno ubrzanje i o njemu će se raspravljati kasnije u ovoj glavi, u vezi sa kružnim kretanjem.

Za svaku vrstu kretanja udaljenost (s) predmeta od njegove polazne tačke dobija se kao proizvod srednje brzine (V_{sr}) i vremena (t).

$$S = V_{sr} \cdot t$$

Kad je kretanje jednako ubrzano (a je konstantno), odnos između srednje brzine (V_{sr}) i početne brzine (V_o), s jedne strane, i krajnje brzine (V_f), s druge strane, može se izraziti jednačinom:

$$V_{sr} = \frac{V_o + V_f}{2}$$

jer je srednja vrednost dveju količina, od kojih jedna predstavlja početnu a druga krajnju veličinu, jednakih njihovom poluzbiru. Zamenjivanjem i prebacivanjem pojedinih članova počev od jednačine:

$$a = \frac{V_f - V_o}{t - t_0}$$

i jednačine:

$$V_{sr} = \frac{V_o + V_f}{2}$$

pa do jednačine:

$$S = V_{sr} t \text{ ili } \left(V_{sr} = \frac{S}{t} \right)$$

može se izvesti jednačina:

$$S = V_o t + \frac{at^2}{2}$$

Evo kako se izvodi ova jednačina:

Iz izraza

$$a = \frac{V_f - V_o}{t - t_0}$$

u kojem je $t_0 = 0$

dobija se $V_f = V_o + at$.

Ako se u jednačini:

$$S = V_{sr}t$$

zameni V_{sr} njegovom vrednošću:

$$\frac{V_0 + V_f}{2}$$

dobije se:

$$S = \frac{(V_0 + V_f)t}{2}$$

Ova jednačina kombinovana sa jednačinom:

$$V_f V_0 + at$$

daće rezultat:

$$S = \frac{(V_0 + V_0 + at)t}{2}$$

ili:

$$S = \frac{(2 V_0 + at)t}{2}$$

Daljim svođenjem dobija se:

$$S = V_0 t + \frac{at^2}{2}$$

što predstavlja konačnu formulu.

Ako se prepostavi da je početna brzina jednaka nuli, ova formula glasi:

$$S = \frac{1}{2} at^2$$

gde je:

S = rastojanje u m;

a = ubrzanje u m/s;

t = vreme u sekundama.

Ako je početna brzina (V_0) jednaka nuli, onda je izraz:

$$V_0 t = 0$$

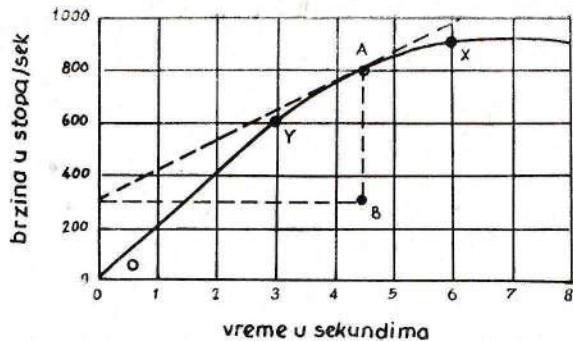
pa se jednačina:

$$S = V_0 t + \frac{at^2}{2}$$

svodi na:

$$S = \frac{at^2}{2} \text{ ili } S = \frac{1}{2} at^2.$$

Praktičan primer primene ovih formula koje se odnose na ubrzano kretanje može se ilustrovati prepostavljanjem da je raketa lansirana iz položaja mirovanja i da u toku svake naredne sekunde postiže za 60 m veću brzinu. Prema tome, može se reći da raketa ima ubrzanje od 60 m u svakoj sekundi. Na kraju treće sekunde raketa će imati brzinu od 180 m u sekundi, i tako dalje, sve dok može da zadrži isto ubrzanje.



Sl. 101 — Kriva ubrzanja projektila

Za vreme ovog perioda povećanja brzine, svaka vrednost brzine od nule pa do najveće koju raketa postigne odgovara određenom trenutku vremena.

Ako se nacrti grafikon trenutnih vrednosti brzine, naći će se da one, kao što je prikazano na gornjem grafikonu, opisuju krivu.

Kriva je od tačke 0 do tačke Y prava linija, što pokazuje da je raketa u prve tri sekunde imala isti priraštaj brzine, to jest, da joj je ubrzanje bilo stalno.

Posle tačke Y kriva se nagnije i time pokazuje da se ubrzanje smanjuje dok u tački X ne postane horizontalna, pokazujući sad da je ubrzanje jednako nuli, odnosno da je brzina stalna.

Ako se ubrzanje tela posmatra kao promenu njegove brzine u toku bilo kog vremenskog razmaka, podeljena trajanjem tog razmaka, onda se njegova definicija zasniva na promeni brzine, a ne na pređenom putu. Definicija se tada može iskazati u obliku jednačine, pretpostavljajući da se kretanje tela posmatra u određenom vremenskom intervalu.

Uzimajući da je V_0 brzina tela na početku perioda posmatranja, a V_f njegova konačna brzina na kraju tog perioda, promena brzine je:

$$V_f - V_0$$

Ako se ova promena dešava u periodu vremena t , srednje ubrzanje tela za vreme tog perioda je:

$$a_{sr} = \frac{V_f - V_0}{t}$$

Ako ponovo pogledamo sliku 101 koja pokazuje krivu ubrzanja rakete, vidimo da se brzina posmatrane rakete povećala od 180 na 270 m/s u toku vremenskog razmaka između treće i šeste sekunde nakon lansiranja. Ali za vreme ovog perioda brzina se ne povećava jednakom, kao što se to događa u periodu od trenutka lansiranja pa do kraja treće sekunde posle lansiranja; zato se posle tačke Y ubrzanje menjia od momenta do momenta.

Ali, koristeći se formulom:

$$a_{sr} = \frac{V_f - V_0}{t}$$

može se izračunati srednje ubrzanje koje je raketa imala u vremenskom intervalu između treće i šeste sekunde. Dakle:

$$a_{sr} = \frac{270 \text{ m/s} - 180 \text{ m/s}}{6 \text{ s} - 3 \text{ s}} = \frac{90 \text{ m/s}}{3 \text{ s}} = 30 \text{ m/s}^2$$

Na sličan način, uzimajući bilo koji vremenski interval u toku perioda od prve tri sekunde posle lansiranja raketne (period jednako ubrzanja), dobija se da je ubrzanje tela bilo 60 m/s^2 .

Ako se pomoću pomenute krive potraži koliko je bilo ubrzanje tokom vremenskog intervala između pete desetine prve sekunde (V_0) i druge sekunde nakon izbacivanja raketne (V_f), naći će se da je:

$$V_0 = 30 \text{ m/s}, \quad V_f = 120 \text{ m/s}, \quad t = 1,5 \text{ s} \\ (2 - 0,5).$$

Ako se ove vrednosti upotrebe u gornjoj formuli, jednačina glasi:

$$a_{sr} = \frac{120 \text{ m/s} - 30 \text{ m/s}}{1,5 \text{ s}} = \frac{90 \text{ m/s}}{1,5 \text{ s}} = 60 \text{ m/s}^2$$

Ako se uzima sve kraći i kraći vremenski interval, onda se srednje ubrzanje sve više približava trenutnom ubrzanju.

U predelu koji se karakteriše beskonačno malom promenom brzine »dv« (delta v), promenom koja se dešava u beskonačno kratkom vremenskom intervalu »dt« (delta t), trenutno ubrzanje može se izraziti kao:

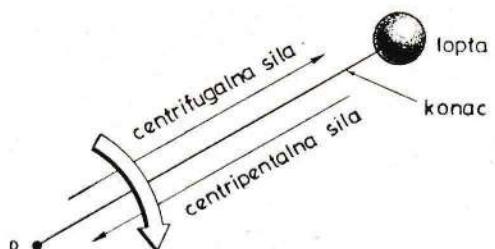
$$a = \frac{dv}{dt}$$

Kratko rečeno, »ubrzanje je vremenska promena brzina«, a njegova veličina u bilo kom određenom momentu predstavlja se grafički nagibom krive brzina — vreme u odgovarajućoj tački. Prema tome, iz slike 101, na kojoj je predstavljena kriva ubrzanja raketne, može se dobiti trenutno ubrzanje u bilo kom vremenu nakon lansiranja raketne povlačenjem tangente na krivu u tački gde ona prelazi određenu vremensku ordinatu i određivanjem nagiba ordinata. Na primer, ako se želi naći trenutno ubrzanje raketne u tački koja označava vreme od 4,5 sekunde posle lansiranja raketne, treba nacrtati tangentu na krivu u tački A, gde kriva prelazi ordinatu vremena od 4,5 sekunde. Pošto je $AB = 240 \text{ m/s} - 90 \text{ m/s}$ ili 150 m/s , nagib iznosi 150 m/s : $4\frac{1}{2} \text{ s} = 33,3 \text{ m/s}^2$.

Ova vrednost je trenutno ubrzanje raketne u momentu kad se navršilo 4,5 sekunde posle lansiranja raketne.

Centrifugalna i centripetalna sila. Saglasno drugom Njutnovom zakonu, telo u kretanju neće skrenuti s prave linije ako na njega ne dejstvuje neka bočna sila. Kad lokomotiva stigne na krivinu pruge, njeno kretanje dovodi do toga da obodi odgovarajućih točkova pritiskuju ivicu spoljnje šine i obratno — šina pritiskuje obode. Kao rezultat dejstva ove sile, upravljenje ka unutrašnjosti krivine lokomotiva menja pravac i ide po krivoj pruzi.

Bočna sila koja je potrebna za kretanje duž krivine može se ilustrovati i loptom privezanim za konac, kako je to prikazano na slici 102. Kad se lopta vrti u krug, ona dejstvuje centrifugalnom silom na konac. Zbog dejstva centrifugalne sile konac se zateže i dejstvuje na loptu silom koja je vuče unutra i naziva se centripetalna sila.



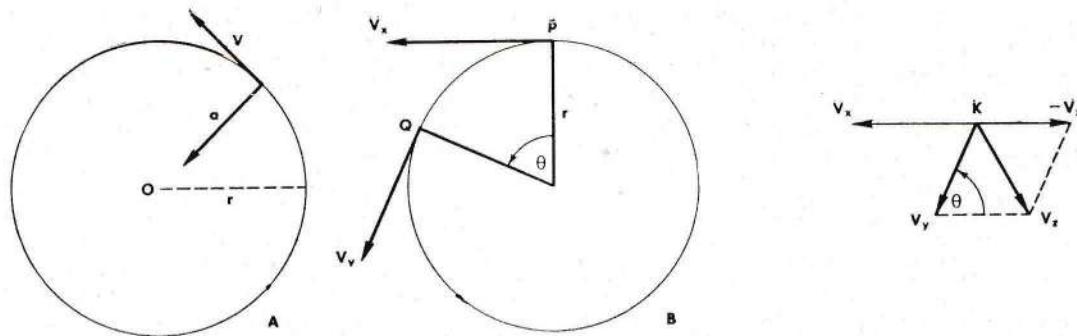
Sl. 102 — Sile koje dejstvuju na lopticu koja se vrti po krugu privezana za žicu

Lopta, krećući se po kružnoj putanji jednakom brzinom, zateže konac konstantnom silom upravljenom u spoljnju stranu duž radijalne linije koja ide od središta njene putanje obrtanja. Pošto za svaku akciju uvek postoji jednaka ali suprotno orijentisana reakcija, konac deluje na telo koje se kreće jednakom silom usmerenom ka centru.

Prema tome, svako kretanje duž krive prate dve sile: centrifugalna i centripetalna; one su po jačini jednakе ali po smislu suprotne i obe deluju u ravni u kojoj leži kriva. No, iako jednakе, ove sile ne mogu jedna drugoj držati ravnotežu jer ne deluju na isti objekat.

Neuravnovežena sila uvek izaziva ubrzanje. Centripetalna sila, delujući na telo koje se nalazi u kružnom kretanju, neprestano ga ubrzava u pravcu centra kruga. Kretanje tela po krugu rezultat je ovog kretanja ka centru kombinovanog sa kretanjem tela napred.

Potrebno je da se uoči ponovo činjenica da se vektor brzine, iako se kreće po kružnoj putanji jednakom brzinom, neprestano menja, samo ne po veličini, nego po pravcu.



SL. 103 — Određivanje ubrzanja tela koje se kreće po krugu

Pretpostavimo da se telo kreće jednakom brzinom po krugu poluprečnika r opisanom iz centra O , kao što je pokazano na dijagramu A na slici 103. Pretpostavimo, takođe da ono u toku vremenskog razmaka t prelazi rastojanje $PQ = vt$, kao što je pokazano na dijagramu B. Njegove brzine u tačkama P i Q mogu se predstaviti vektorima V_x i V_y ucrtanim kao tangente na krugu u tačkama P i Q. Brzine su po veličini jednake v .

Ove brzine se razlikuju po pravcu, pokazujući da se telu u kretanju od tačke P do tačke Q morala dati neka dodatna sila da bi se njegova brzina promenila od V_x u V_y . Da bi se odredila ova dopunska sila, treba V_x i V_y povući od zajedničke tačke, kao na dijagramu C. Zatim se V_x oduzme od V_y . Ovo se čini na taj način što se obrne pravac V_x u suprotnu stranu i što se slože vektori, saglasno zakonu o paralelogramu sila objašnjrenom na slici 100. Kao što je pokazano, promena brzina je V_z .

Pošto se promena brzine od V_x do V_y dešava u toku vremena t , srednje ubrzanje u tom vremenu je:

$$a = \frac{V_z}{t}$$

Da bi se odredilo trenutno ubrzanje, najpre treba uočiti da su uglovi označeni sa Θ (teta) jednaki. Pod pretpostavkom da je vremenski razmak sve kraći, uglovi označeni sa Θ postajuće sve manji. Prema tome, kad se vreme približi nuli, isečak POQ na slici B biće veoma sličan ravnom kracu trougla čije jednake strane obrazuju ugao Θ slike C. Ova sličnost se povećava dok se konačno ne dobije da je:

$$V_z : V_y = PQ : OP$$

ili

$$\text{at : } V_y = vt : r$$

Pošto je V_y brojno jednako v , veličina ubrzanja može se naći ako se u drugom članu jed-

načine at : $V_y = vt : r$ zameni V_y sa v . Dakle:

$$\text{at : } v = vt : r$$

Odavde, množenjem unakrst, dobija se:

$$\text{atr} = v^2 t$$

Posle skraćivanja t :

$$\text{ar} = v^2$$

Ako sad prebacimo r na drugu stranu, dobija se uprošćena jednačina:

$$a = \frac{v^2}{r}$$

Gornji tok izvođenja pokazuje da je ubrzanje vektorska veličina. Pravac ove vektorske veličine može se naći kad se uoči činjenica da V_z postaje utoliko upravljivo na V_x , ukoliko se uzima kraći vremenski interval, dok na granici ($t = 0$) ne postane upravno na oba vektora: V_x i V_y . Na taj način se vidi da je *centripetalno ubrzanje upravljeno ka središtu kruga*.

Jednačina:

$$F = \frac{W}{g} a$$

u kojoj je a ubrzanje koje izaziva konstantna sila F dejstvujući na telo težine W , a g ubrzanje usled Zemljine teže, može se upotrebiti da bi se pokazalo kolikom se silom mora delovati na telo da bi se proizvelo ubrzanje.

Prema tome, centripetalna sila koja deluje na telo težine W kilograma kad se ono kreće brzinom v metara u sekundi po krivoj poluprečniku r metara može se izraziti sa:

$$F = \frac{Wv^2}{gr}$$

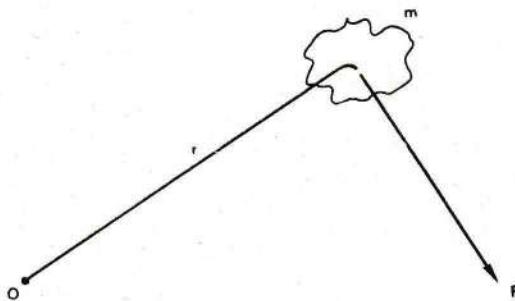
U ovoj jednačini treba uočiti činjenicu da je centripetalna sila koja deluje na telo u pokretu po kružnoj putanji upravo srazmerna kvadratu brzine a obrnuto srazmerna poluprečniku kruga.

Sila kojom se telo privlači ka Zemlji smanjuje se usled obrtanja Zemlje. Uticaj ovog obrtanja najuočljiviji je na ekvatoru gde je brzina usled Zemljinog obrtanja najveća. Uticaj Zemljine teže na ekvatoru iznosi 0,0035 ili 3,17 kg po toni. Brzina na polovima je jednak nuli. Predmet koji na ekvatoru teži 100 kg ima na polovima težinu od oko 100,3 kg.

UGAONO UBRZANJE

Da bismo ilustrovali kombinovano dejstvo sila, pogledajmo kako momenat sile proizvodi ugaono ubrzanje.

Momenat sile je obrtni efekat na telo. Njegova veličina izražava se *proizvodom postojeće sile i upravnog rastojanja između obrtne osovine i pravca dejstva sile*. Upravno rastojanje zove se *krak sile*; prema tome, momenat sile (T) može se izraziti jednačinom $T = FL$, gde je F jačina sile, a L krak sile.



Sl. 104 — Ugaono ubrzanje stvoreno momenatom sile

Služeći se slikom 104, pretpostavimo da je masa (m) privezana za kraj obrtaljke koja nema težine, a može se obrtati oko osovine u tački O . Pretpostavimo takođe da je sila F koja deluje na masu stalna i da njen pravac čini s pravcem obrtaljke uvek prav ugao (da je u odnosu na njega tangencijalan). Kad se masa kreće pod tim uslovima, obrtaljka je vuće ka središtu i primorava je da ide po kružnoj putanji. U isto vreme, tangencijalna sila F nateruje je da se kreće po krugu sve većom brzinom, dajući joj ubrzanje duž te putanje jednako F/m . Otuda:

$$\alpha = \frac{F}{m}$$

U međuvremenu, obrtaljka će imati sve veću ugaonu brzinu, i ako je obrtaljka dužine r , njeno ugaono ubrzanje može se izraziti sa α (alfa) = $\frac{a}{r}$ gde je a trenutno ugaono ubrzanje.

Ugaono ubrzanje tela definiše se kao promena njegove ugaone brzine u vremenu, dakle

$\alpha = \frac{dw}{dt}$ gde je dw beskonačno mala promena ugaone brzine koja se dešava u beskonačno malom vremenskom intervalu »dt«.

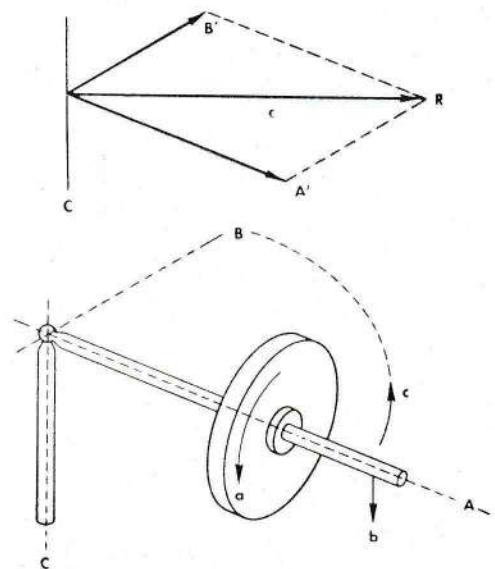
Sila F , delujući na masu m , stvara momenat sile T u odnosu na osovinu O , koji se može izraziti jednačinom $T = Fr$.

PRECESIJA

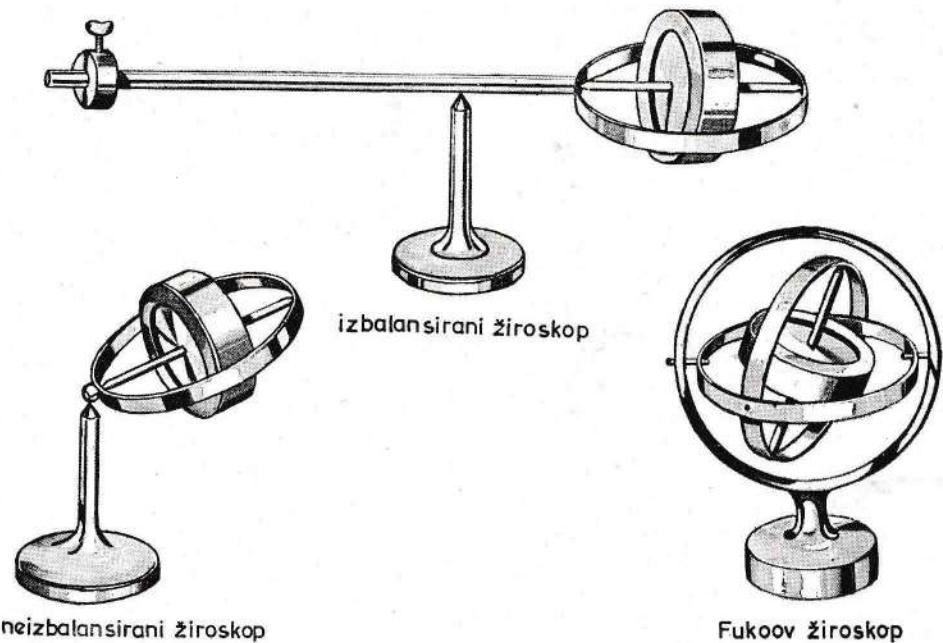
Kad telo treba da se obrće dvema ugaonim brzinama oko posebnih osovina, onda se stvara kretanje oko treće osovine. To novo kretanje zove se precesija. Ova vrsta kretanja ilustrovana je na slici 105 primerom točka koji je slobodno namešten između dve karike na osovinu A . Pretpostavimo da se točak obrće. Osovina se ne obrće s točkom, i jedan njen kraj postavljen je horizontalno na stožeru koji se nalazi na uspravnoj šipki C . Drugi kraj osovine je nepoduprт. Ako se točak ne bi obrtao, slobodan kraj osovine bi pao i ceo sklop bi spao s vertikalnog podupirača.

Ali kad se točak obrće, težnja slobodnog kraja osovine da padne prisiljava točak i osovinu da opisuje horizontalne krugove oko stožera; drugim rečima, točak se premešta napred u horizontalnoj ravni.

Odredimo sad kako se precesija razvija. Ugaona brzina točka koji se obrće u pravcu a oko osovine A predstavljena je vektorom A paralelnim osovinu A . Dejstvo Zemljine teže na točak stvara momenat sile koji teži da odvuče ceo sklop oko osovine B u pravcu pokazanom strelicom b .



Sl. 105 — Precesija točka koji se obrće oko jednog kraja osovine



Sl. 106 — Osnovni tipovi žiroskopa

Ovaj momenat sile proizvodi uglovno ubrzanje i saopštava telu dodatnu uglovnu brzinu oko osovine B, predstavljenu vektorom B. Ako se ta brzina B doda telu tako da obe budu u istoj horizontalnoj ravni, rezultanta će biti R. Prema tome, osovina A promeniće svoj položaj da bi se postavila u pravcu R, obrćući se pri tom oko osovine C, kao što pokazuje strelica c. Ovo precesiono kretanje vrši se oko osovine C koja je upravna kako na osovinu A, tako i na osovinu B.

Precesija se neprestano nastavlja, jer čim osovina dospe u položaj R, sklop, zbog težnje slobodnog kraja da padne, postaje predmet delovanja drugog momenta sile. Odgovarajuća promena ugaone brzine nalazi se u odnosu na R pod pravim uglom, pa se obrazuje nova rezultanta ka kojoj se zatim osovina premešta, i tako dalje. Ovo premeštanje osovine ne izgleda kao niz odvojenih koraka, nego se u stvari sastoji od neprestanih beskonačnih malih ugaonih premeštaja, što ima za posledicu jednoličnost brzine precesije.

Može se dokazati da je ugaona brzina precesije točka Ω (omega) — jednaka momentu sile T, koji teži da promeni pravac osovine, podeljenom proizvodom ugaone brzine točka ω i njegovog momenta inercije (I):

$$\Omega = \frac{T}{\omega I}$$

Na gornjim principima fizike zasnivaju se teorija i rad žiroskopa koji nalazi mnogostruku primenu u sistemima za vođenje i upravljanje projektila.

Rad žiroskopa kao primer precesije. Žiroskop ilustruje bolje nego bilo koja druga prosta sprava fizičke principe i sile. Jedan oblik žiroskopa koji je dobro poznat jeste Zemlja. Ona liči na ogroman žiroskopski rotor koji se slobodno vrti u prostoru oko zamišljene osovine koja prolazi kroz njene polove. Zahvaljujući brzini rotacije, Zemlja zadržava nepromenjen položaj u vacioni i ostaje stalno u istoj ravni rotacije sa polovima upravljenim približno u istom pravcu u prostoru.

Ako se ostave po strani razlike u fizičkom obliku i izvesne razlike koje su rezultat trenja u ležištima i struktualne neizbalansiranosti, žiroskop predstavlja isti fizički fenomen kao i Zemlja, a u pitanju su i iste sile.

Žiroskop se u osnovi sastoји od točka ili diska postavljenog tako da se može brzo vrteti oko osovine koja se može nazvati osa simetrije; u isto vreme, on je i tako namešten da se može obrnati oko jedne ili dve osovine koje stoje upravno jedna na drugu, a upravne su i na osovinu vrćenja. Na slici 106 pokazane su tri vrste žiroskopa.

Ako se, dok se točak vrti, u odnosu na jednu od tih osovine priloži momenat sile, on će proizvesti precesiono kretanje oko druge osovine,

koja tada postaje osovina precesije. Pod određenim uslovima, zavisno od njihove orijentacije, ove dve osovine mogu biti horizontalna i vertikalna osovina.

Druga sila koja deluje na telo, ali u manjem stepenu, jeste Koriolisova sila, nazvana tako po francuskom inženjeru G. G. Koriolisu (Coriolis), koji je prvi obratio pažnju na nju.

Koriolisova sila je sila koja skreće telo u kretanju; ona se javlja kao rezultat obrtanja Zemlje. Na severnoj hemisferi ta sila skreće udesno tela koja se horizontalno kreću, a na južnoj hemisferi skreće ih uлево. Na tela u mirovanju ne deluje.

Žiroskopi se dele na tri osnovna tipa: na izbalansirane, neizbalansirane i Fukooove (Foucault).

Izbalansirani žiroskop je žiroskop koji je stavljen na jedan kraj horizontalnog štapa pa balansira na stožeru pomoću protivtega nameštenog blizu drugog kraja štapa.

Neizbalansirani žiroskop je žiroskop koji nemani štapa ni protivtega van stožera.

Fukoov žiroskop je žiroskop čiji se rotor oslanja na osovine, tako da se može slobodno obrati oko bilo koje ose, a delovi su mu tako izbalansirani da Zemljina teža ne stvara obrtni momenat za rotor.

Žiroskop koji se vrti predstavlja znatan otpor svakom momentu sile koji nastoji da promeni pravac ose obrtanja (veličina tog otpora zavisi od ugaonog momenta). Ova osobina, poznata kao *krutost*, čini žiroskop pogodnim da se upotrebni u svojstvu stabilizatora u slučajevima kao što su: pružanje otpora skretanja broda ili aviona, održavanje ravnoteže tela koje se kreće i rad sprave za upravljanje.

Ako se kretanje Fukooovog žiroskopa u odnosu na jednu osu ograniči, a saopšti se obrtno kretanje u odnosu na drugu osu, onda će se ose obrtanja postaviti paralelno sa ovom drugom osom. Ovaj je princip primenjen kod žirokom-pasa.

O žiroskopima koji se u mnogim oblicima i modifikacijama upotrebljavaju u sistemima za upravljanje i vođenje vođenih projektila, govorice se podrobnije kad se budu analizirali ti sistemi.

Ovaj odeljak može se rezimirati konstatacijom da je žiroskop sistem sa sledećim svojstvima:

- Ne klati se, a može da se obrće oko neke tačke.
- Ima simetrično telo koje se vrti velikom konstantnom brzinom oko svoje ose simetrije (osa obrtanja).

c. Ukupan ugaoni momenat sistema stvarno mu je koncentrisan oko ose obrtanja.

d. Osa simetrije žiroskopa fiksirana je u inercijalnom prostoru. Inercijalni prostor se može shvatiti kao oblast u kojoj se uzima da su sva ubrzanja jednakana nuli, a sve privlačne sile u ravnoteži.

Iz uslova da je ubrzanje jednakano nuli proizilazi da se prostor bez ubrzanja takođe ne sme obrnati, pošto je obrtanje uvek vezano s ubrzanjem.

Inercijalni prostor pokorava se Njutnovim zakonima kretanja, kao što to pokazuje primer sa primjenom silom koja je jednakana brzini promene linearne momenta. Linearni momenat je vektorska količina koja predstavlja momenat translacije, a jednakana je proizvodu mase i brzine središta mase.

Po našoj koncepciji inercijalnog prostora, koji mi obično povezujemo s »nepokretnim« zvezdama, vektor zbiru svih sila koje dejstvuju u prostoru jednak je nuli.

ENERGIJA

Telo poseduje *energiju* ako je sposobno da vrši rad.

Kad telo vrši rad, njegova se energija smanjuje za veličinu koja je tačno jednakana izvršenom radu. Ako se telo stavi u pokret, ono će ispoljiti izvesnu silu i trošiti energiju vraćajući se u stanje mirovanja. Na taj način ono je izvršilo rad.

Telo koje se kreće poseduje uvek energiju zahvaljujući svom kretanju; takva energija zove se *kinetička energija*. Telo u mirovanju može da poseduje *potencijalnu energiju* zbog svog položaja, telo poseduje takvu energiju kad je u položaju iz koga je u stanju da vrši rad.

Zakon održanja materije kaže da se materija ne može ni stvoriti ni uništiti. Saglasno tome, ukupna količina materije u svemiru ostaje nepromenjena.

Iz napred navedena dva zakona fizike može se zaključiti da se, kad se vrši rad, energija ili oslobađa ili stavlja u pokret. Energija se ne stvara. U istom procesu materija može menjati oblik; ona se ne uništava.

Do jednog drugog oblika mehaničkog rada dolazi kad se neko telo kreće po drugom. Rad se tada vrši da bi se savladalo trenje koje postoji između tela. Prema tome, kad se na telu vrši neki rad, on se može ostvariti samo sa jednim od sledećih efekata ili sa više tih efekata:

- Povećanjem kinetičke energije tela
- Povećanjem njegove potencijalne energije
- Stvaranjem toplove usled trenja.

RAVNOTEŽA

Za telo koje produžava da miruje kaže se da je u *statičkoj ravnoteži*. Najprostije stanje ravnoteže je ono u kojem na telo deluju samo dve sile. U tom slučaju jedna od tih sila mora biti po veličini jednaka, a po smeru suprotna drugoj, kao što je pokazano na slici 107.

Prvi uslov ravnoteže zahteva da vektorski zbir svih sila koje deluju na telo u bilo kom pravcu mora biti jednak nuli.

Dруги uslov ravnoteže zahteva da momenti sile koje deluju na telo budu izbalansirani; momenti sila u smislu kretanja satne kazaljke moraju biti jednak momentima sila suprotnim kretanju satne kazaljke. Uočava se na dijagramu na slici 108 da je algebarski zbir momenata sila jednak nuli. Na dijagramu je:

$$\frac{m_1 l_1 = m_2 l_2}{10 \times 1 = 5 \times 2}$$

Sledeća teorema, koja je važna, zasniva se na drugom uslovu ravnoteže: »Ako tri neparalelne sile delujući na telo stvaraju ravnotežu, njihovi pravci dejstva moraju prolaziti kroz zajedničku tačku«.

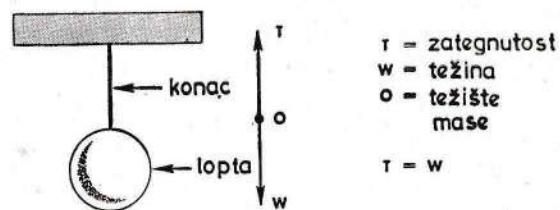
Ova se teorema može dokazati ako se uzmu momenti sila u odnosu na presek dva pravca dejstva i pokaže da krak treće sile mora biti jednak nuli. Prepostavimo da se telo nalazi u stanju ravnoteže pod dejstvom triju sila, koje su različite, kao na slici 109.

Pošto njihovi pravci dejstva nisu paralelni, oni će se, ako se produže, preseći u nekoj tački. Tako će se pravci dejstva sila »F₁« i »F₂« preseći u tački »O«. Nacrtajmo od ove tačke liniju »OA« upravno na treću silu »F₃«, presecajući njen pravac dejstva u tački »A«.

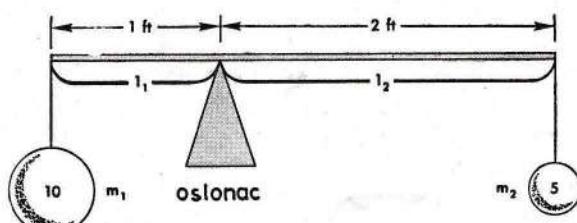
Primenimo drugi uslov ravnoteže (algebarski zbir momenata sile = 0), uzimajući momente sve tri sile u odnosu na tačku »O« i stavljajući da je njihov zbir jednak nuli. Momenti sila »F₁« i »F₂« jednak su nuli, pošto njihovi pravci dejstva prolaze kroz tačku »O«, pa su prema tome njihovi kraci jednak nuli.

Pošto je telo u ravnoteži, očekivalo bi se da je momenat treće sile »F₃« u odnosu na »O« jednak nuli, a pošto sila »F₃« nije nula, njen krak »OA« bi morao biti nula a ne onoliki koliki je prikazan. To jest, pravac dejstva sile »F₃« mora prolaziti kroz »O«. Prema tome, pravci dejstva triju sila u ravnoteži prolaze kroz zajedničku tačku.

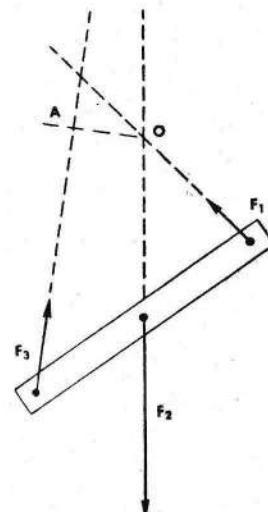
Iz gore navedenog primera može se izvući zaključak: Kad se telo nalazi u stanju ravnoteže, pod dejstvom tri sile rezultanta bilo koje dve od tih sile jednak je ali po pravcu suprotna trećoj sili.



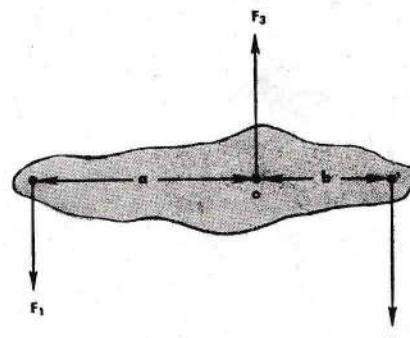
Sl. 107 — Prosta ravnoteža



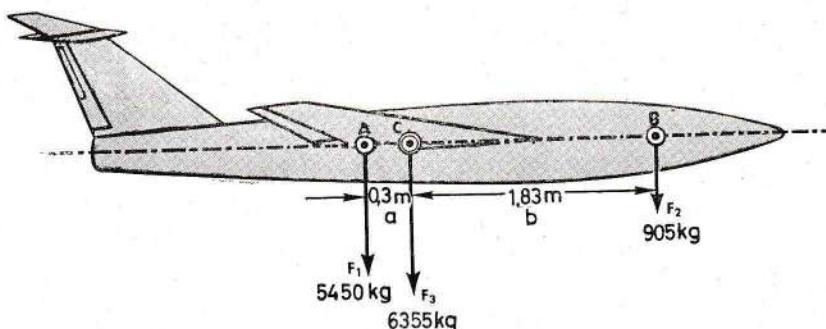
Sl. 108 — Primer uravnoveženih momenata sile koje deluju na polugu poduprta u jednoj tački



Sl. 109 — Telo pod dejstvom triju sila



Sl. 110 — Telo u ravnoteži pod dejstvom triju paralelnih sila



Sl. 111 — Promena težišta usled toga što je projektilu dodata težina

Isti princip koji je primenjen u prethodnom primeru može se primeniti i pri određivanju rezultante dve paralelne sile.

Pretpostavimo da je telo prikazano na slici 110 u ravnoteži pod dejstvom tri paralelne sile F_1 , F_2 i F_3 . Iz prvog uslova ravnoteže, $F_3 = F_1 - F_2$. Rezultanta sila » F_1 « i » F_2 « je jednaka ali po pravcu suprotna sila » F_3 «. Kad se momenti sila uzmu u odnosu na tačku »O«, onda je iz drugog uslova ravnoteže $F_{3b} - F_{1a} = O$. Ova jednačina pokazuje važan odnos između sila i njihovih krakova:

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{a}{b}$$

Prema tome, rezultanta dveju paralelnih sila ima isti pravac kao sile i jednaka je njihovom zbiru, a pravac dejstva rezultante deli rastojanje između njih na dva dela koji su obrnuto srazmerni jačinama odnosnih sila.

Rezultanta bilo kog broja paralelnih sila može se odrediti ako se najpre odredi sila koja će zajedno s datim silama stvoriti ravnotežu. Ta se sila zove *ekvibrant* datih sila, a *rezultanta je jednaka ili suprotna ekvibrantu i deluje duž istog pravca*.

Sila kojom Zemlja privlači telo deluje na svaku česticu materije iz koje je telo sastavljeno. Zbog toga se težina tela može smatrati kao zbir paralelnih sila koje deluju na pojedine čestice tela. Ako se te paralelne sile zamene njihovom rezultantom, ova jedina sila potpuno je ekvivalentna njima.

U svakom datom predmetu postoji naročita tačka kroz koju će uvek prolaziti rezultanta težine, bez obzira na orientaciju predmeta. Ova tačka zove se *težište tela* (T.T.). Stoga se težina predmeta, mada stvarno predstavlja sistem paralelnih sila koje deluju na sve njegove sastavne delove, može se pravom predstaviti jednom jedinom silom koja deluje naniže u njegovom težištu.

Postoje slučajevi kad je poželjno da se nađe težište projektila. Na primer, gore navedeni principi primenjivi su kad se težište projektila pomerilo zbog dodavanja tereta letelici.

Ako težina projektila sa slike 111 bez bojne glave iznosi 5450 kg, a težište je u tački »A«, dodavanje bojne glave težine 905 kg, a sa težištem u tački »B«, stvorice rezultantnu silu naniže jačine 6355 kg u novom težištu pokazanom u tački »C«. Ako je rastojanje između tačaka »A« i »B« 2,14 m, novo težište biće za 30,5 cm (a) ispred prvobitnog T.T., pokazanom u tački »A«. Promena položaja T.T. za 30,5 cm nađena je na sledeći način:

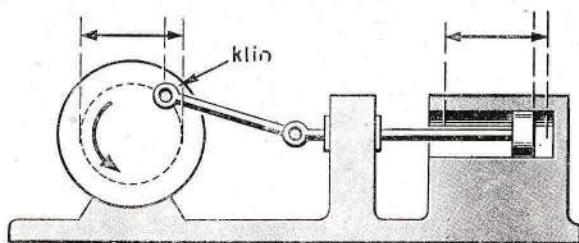
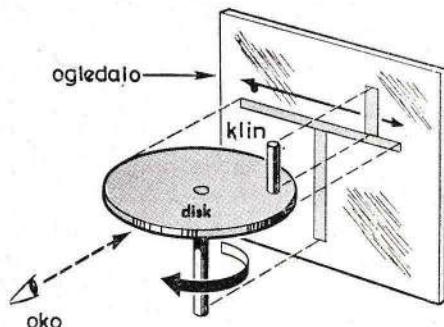
$$\begin{aligned} F_2 (F_1 = a) b, F_1 \times a &= F_2 \times b \\ 5450 \times a &= 905 (2,14 - a), a + b = 2,14 \text{ m} \\ 5450 a &= 1940 - 905 a \\ a &= \frac{1940}{6355} = 0,305 \text{ m} \end{aligned}$$

HARMONIJSKO KRETANJE

Principi na kojima počiva *harmonijsko kretanje* tesno su povezani s principima *kružnog kretanja*. Ovi principi važe kako za mehaničke tako i za električne sisteme.

Harmonijsko kretanje se definiše kao treperenje (vibriranje) pri kome su ubrzanje treperéćeg tela i *restorirajuća sila* koja na telo deluje srazmerni udaljenosti tog tela od srednje tačke njegove putanje i upravljeni su prema toj tački.

Veza između harmonijskog i kružnog kretanja pokazana je na slici 112. Ako se klin na obodu diska koji se obrće posmatra iz položaja oka u ravni diska, u ogledalu izgleda kao da treperi *tamo-amo* duž puta koji je po dužini jednak prečniku diska. Ako se disk obrće jednakom brzinom, premeštanje projekcije usled jednakog kružnog kretanja jeste harmonijsko kretanje.



Sl. 112 — Harmonijsko kretanje upoređeno sa kružnim kretanjem

U primeru sa mašinom zapazićete slično: kružno kretanje tačke iskorišćeno je za pokretanje klipnjače koja je tako nameštena da se može kretati samo u jednoj ravni. Kad se u ovom slučaju točak obrće konstantnom brzinom, klin koji služi za vezu klipnjače sa točkom kreće se po krugu jednakom brzinom, ali se klipnjači saopštava samo horizontalna projekcija tog kretanja. Stoga ona klizi u cilindru tamo-amo po putu koji je jednak prečniku kruga koji klin opisuje. Kretanje klinu tamo-amo jeste harmonijsko kretanje.

Treba imati na umu da svako kretanje tamo-amo nije harmonijskog kretanja. Mnoge mašine upotrebljavaju delove koji ponavljaju kretanje nazad i napred duž istog puta u jednakim vremenskim intervalima, ali to kretanje ne odgovara definiciji harmonijskog kretanja. Ono se može klasifikovati kao *periodično kretanje*, poshto se ponavlja u istim vremenskim razmacima. Ali takvo kretanje nije harmonijsko, jer brzina promene kretanja nije linearna. Prema tome, činjenica da telo vrši kružno kretanje ne znači da ono tada mora da opisuje i harmonijsko kretanje.

KLATNA

Prilikom kasnijeg proučavanja sastava projektila, videće se da se mnogi delovi upotrebljeni u sistemima za upravljanje i vođenje koriste principom *klatna*. Primeri takvih delova su inercijalni menjaci, stabilizovane platforme, standardi za pokazivanje vremena i kompenzujuće sprave.

Klatno se definiše kao telo koje je tako obešeno o fiksnu tačku da se može slobodno nijhati tamo-amo pod kombinovanim dejstvom gravitacije i početnog impulsa.

Teorija klatna obično se objašnjava na primjeru *prostog ili matematičkog klatna* koje je prikazano na slici 113. Prosto klatno je teorijska sprava koja se sastoji od čestice ili materi-

jalne tačke obešene o konac težine i koja se njiše bez trenja. Kad se zamisli klatno bi postojalo pod ovim uslovima, vreme klačenja može se odrediti ako se uzme da je klatno lako pomereni, pa se zatim proučavaju sile koje na njega dejstvuju. Analiza će pokazati da je sila koja teži da klatno vrati u položaj ravnoteže upravno razmerna njegovom odstojanju od tog položaja a suprotnog je pravca. Njihanje (osciliranje) klatna je harmonijsko, pa se za određivanje vremena trajanja njihanja može upotrebiti jednačina harmonijskog kretanja.

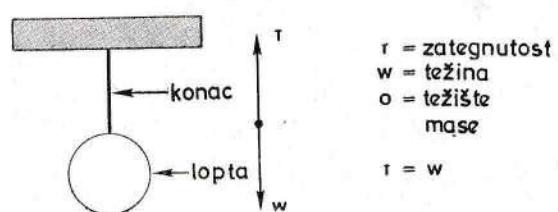
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{1}{g}} T = \text{period}$$

Vreme trajanja njihanja klatna određuje se na osnovu amplitude njihanja (ili ubrzanja zbog gravitacije (g) u tački gde je klatno postavljeno) i dužine klatna (l) (ili rastojanja između osovine vešanja i osovine oscilacije).

Upotreboom klatna poznate dužine i mernjem trajanja njegovog njihanja može se odrediti vrednost ubrzanja Zemljine teže. Jednačina:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{1}{g}},$$

primenjuje se samo kad su vrednost ugaonih udaljenja klatna od ravnotežnog položaja male; nije potrebno da te vrednosti budu konstantne. Kada klatno nastavi da se njiše, amplituda oscilacija



Sl. 113 — Prosto ili matematičko klatno

lacije neprestano se smanjuje, ali period njihanja ostaje praktično nepromenjen. Ovo svojstvo čini klatno naročito pogodnim za kontrolisanje hoda mehanizma hronometara.

Druga vrsta klatna — fizičko ili složeno klatno — jeste telo koje se nije kao klatno, ali čija je masa raspoređena a ne koncentrišana kao kod prostog klatna.

Centar oscilisanja fizičkog klatna je tačka u kojoj koncentracija cele mase klatna ne bi dovela ni do kakve promene u vremenu trajanja oscilacija. Ako bi se masa tako koncentrisala, fizičko klatno bilo bi identično prostom klatnu koje ima isto vreme trajanja oscilacije.

$2\pi\sqrt{\frac{1}{g}}$ predstavlja vreme trajanja oscilacije

prostog klatna, a $2\pi\sqrt{\frac{1}{Mgh}}$ vreme trajanja

oscilacije fizičkog klatna. Ako se ova dva izraza vežu znakom jednakosti, izlazi da je dužina ekvivaletnog prostora klatna:

$$I = \frac{1}{Mh}$$

gde je I momenat inercije, a h rastojanje između osovine vešanja i težišta klatna.

Centar oscilisanja fizičkog klatna udaljen je od osovine vešanja za veličinu $\frac{I}{Mh}$; ovaj izraz takođe pokazuje dužinu prostog klatna čije njihanje traje koliko i njihanje fizičkog klatna. Centar oscilisanja može se zameniti centrom vešanja a da se usled toga ne promeni vreme trajanja klaćenja. Ove karakteristike klatna pogodne su za merenje vremena trajanja klaćenja, za određivanje težišta i drugih činilaca od kojih zavise opšti izgled i letne karakteristike projektila.

Centar oscilisanja je takođe i centar perkusije (udara), jer se u ovoj tački klatno može udariti bez opasnosti da usled toga dođe do potresa na osovinu vešanja. Ova osobina iskorističava se pri određivanju pravilnosti vešanja delova za apsorbovanje udara. Kad se udarac nanese u bilo kojoj drugoj tački sem u centru perkusije, onda ne samo da klatno dobije težnju da se obrne, nego se i osovina sile vešanja primorava da vrši translaciono kretanje.

Postoji još jedna vrsta klatna, tzv. torziono klatno. To je obešeno telo koje se ne klati njihanjem nego obrtanjem, uvijajući se naizmenično u jednu i drugu stranu.

Osobine klatna ove vrste čine ga naročito pogodnim za korišćenje u hronometrima, na točkićima za balansiranje u časovnicima, u instrumentima za merenje momenta sile, spravama za kompenzaciju uticaja momenta sile, magnetometrima, priborima za merenje deformacija i u drugim spravama i instrumentima.

Može se uzeti da je torziono klatno teret zakačen o vertikalno obešenu žicu. Kad se žica uvrne i opusti, teret će opisati niz ugaonih vibracija sličnih linijskim vibracijama harmonijskog kretanja.

Kad se žica o koju je teret obešen uvrće, u njoj se stvara suprotno orijentisani momenat za ponovno uspostavljanje ravnoteže, čija je jačina srazmerna veličini ugla za koji je teret pomeren iz svog ravnotežnog položaja, upravo onako kao što se pri linijskom harmonijskom kretanju stvara restorirajuća sila koja je srazmerna linijskom udaljavanju tela od njegovog ravnotežnog položaja. Ove dve vrste kretanja su vrlo slične, pa se ugaono harmonijsko kretanje može najjednostavnije predstaviti ako se direktno uporedi sa linijskim harmonijskim kretanjem.

Može se uzeti jednačina:

$$\frac{F}{X} = 4\pi^2 n^2 m$$

koja izražava linijsko harmonijsko kretanje, i u kojoj se svaka linearna veličina zameni njenom odgovarajućom ugaonom veličinom i tako izvesti izraz za ugaono harmonijsko kretanje:

$$\frac{T}{\Phi} = 4\pi^2 n^2 I$$

gde je »T« restorirajući momenat sile, »Φ« ugaono pomeranje iz položaja ravnoteže, »n« frekvencija, a »I« momenat inercije vibrirajućeg tela u odnosu na osovinu obrtanja.

Odnos restorirajućeg momenta prema odgovarajućem uvrтанju je konstanta određena krutošću žice za vešanje i neizbežno je negativan (suprotan upotrebljenoj sili). Može se odnos $\frac{T}{\Phi}$ zameniti sa τ (tau), pa ponovo urediti izraz.

Nova jednačina pokazuje frekvenciju ugaonog klaćenja:

$$n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\tau}{I}}$$

Prema tome, vreme trajanja klaćenja izraženo je jednačinom:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{\tau}}$$

što je slično izrazu:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{1}{g}}$$

Ova poslednja jednačina izražava vreme trajanja linijskog vibriranja.

Princip torzije može se iskoristiti za određivanje momenta inercije tela ako se telo obesiti u vrne kao torziono klatno, a zatim meri trajanje klaćenja i ugao uvrtanja stvoren izmeđenim momentom sile.

Transponovanjem jednačine:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{\tau}}$$

može se odrediti momenat inercije »I« obešenog tela:

$$I = \sqrt{\frac{\tau T^2}{4\pi^2}}$$

Na slici 114 sila »F« koja deluje na rastojanju »R« od središta »O« stvara momenat sile »2RF«.

MEHANIKA GASOVA

Gas je jedan od tri oblika u kojima materijal postoji, druga dva su tečnost i čvrsta materija.

Gas se može definisati kao vazdušasti fluid koji nema ni nezavisan oblik ni nezavisnu zapreminu, nego teži da se neograničeno širi. Ova težnja za širenjem posledica je činjenice da su molekuli gasa udaljeni jedan od drugog srazmerno mnogo i da su u neprestanom pokretu kroz ceo prostor koji gas zahvata.

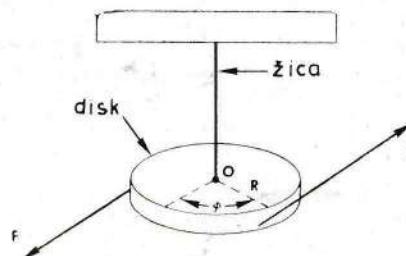
Gasovi u mnogo čemu liče na tečnosti. Pošto su i jedni i drugi sposobni da teku, nazivaju se zajedničkim imenom fluidi.

Dve osnovne razlike između gasova i tečnosti su svojstvo sabijanja i ekspanzije. Gasovi se mogu veoma sabijati, dok je većina tečnosti neznatno podložna ovome. Gasovi teže da potpuno ispune svaki zatvoren sud u koji se mogu smestiti, dok većina tečnosti, kao što je slučaj i sa čvrstim telima, ispunjava sud samo dokle doseže njihova normalna zapremina.

I gasovi i tečnosti vrše pritisak na površine sa kojima su u dodiru, a svako od njih ispoljava naviše potisnu силу koja je u skladu s Arhimedovim principom po kome »telo koje je celo ili delimično potopljeno u neki fluid potiskuje naviše sila jednaka težini istisnutog fluida«.

Gasovi koji ističu teže da se ponašaju slično Bernulijevoj (Bernoulli) teoremi o tečnosti kad se njihova sabijenost uzme kao činilac. Brzina njihovog isticanja kroz otvor može

se izračunati na isti način kao brzina isticanja tečnosti. Bernulijeva teorema kaže: »Kad se na nesabijenu tečnost ili na tečnost za vreme njenog isticanja ne vrši nikakav rad, onda ukupan napor ostaje nepromenjen«. »Ukupnim naporom« naziva se ukupna energija tekuće tečnosti u dатој tački. Iz ove teoreme može se zaključiti da kad sabijeni fluid teče, onda ukupan napor varira srazmerno stepenu sabijenosti.



Sl. 114 — Torziono klatno

Dokaz Bernulijeve teoreme je prost kad se ona primeni na hipotetične fluide koji ne bi imali svojstvo sabijanja ili na vodu koja ima neznatno svojstvo sabijanja. Ali se usložava kad se primeni na gasove koji imaju visoke sposobnosti sabijanja i čije se gustine menjaju s promenom pritiska.

No, opšti efekat se primenjuje na sve fluide. Što se tiče gasova, dovoljno je da se ima na umu da kad ističući mlaz gase povećava brzinu, njegov pritisak opada i obratno. Ovaj efekat je primetan u slučaju uzgona koji se vrši na aeroprofil u pokretu i utiče na konstrukciju aeroprofila za naročitu upotrebu. O uzgonu se raspravlja u glavi 2.

Gasovi se, kao i tečnosti, prilagođavaju obliku suda u koji se smeštaju i, pošto nisu elastični, nisu sposobni za izvršenje drugih otpora pritiska sem onih koji potiču od njihove viskoznosti.

Gas koji se pod dejstvom pritiska može pretvoriti u tečnost zove se para. Na sobnoj temperaturi, vodena para i ugljjenioksid nazivaju se parama; ali se vazduh, vodonik i azot zovu gasovima.

KINETIČKA TEORIJA GASOVA

Prosta struktura gasova čini ih vrlo pogodnim za matematičke analize iz kojih je nastala detaljna teorija o ponašanju gasova. Ova teorija zove se *Kinetička teorija gasova*. Ona polazi od toga da je gasovito telo sastavljeno od identičnih molekula koji se ponašaju kao sitne elastične lopte, razmeštene relativno daleko jedna od druge i koje su neprestano u pokretu.

Stepen molekularnog kretanja zavisi od temperature gasa. Pošto molekuli neprestano udaraju jedan o drugog i o zidove suda, porast temperature i, kao posledica toga, brže kretanje molekula, dovodi do odgovarajućeg porasta broja sudara između molekula. Porast broja sudara ima za rezultat porast pritiska, jer veći broj molekula udara o zidove suda u dатој jedinici vremena.

Ako je sud otvoren, gas teži da se raširi i isteče iz suda. Ali ako je sud zatvoren a elastičan (kao što je slučaj s gumenim balonom), povećani pritisak prisiliće sud da se širi.

Može se primetiti da u toku duge vožnje po toploj vremenu poraste pritisak u gumama automobila, a da se guma koja je za vreme sveže jutarnje temperature izgledala možda »meka« na višoj temperaturi, tokom sredine dana, pokazala kao normalna.

Pojave kao što su ove objašnjene su i formulisane u obliku zakona koji se odnose na gaseve; one govore u prilog Kinetičke teorije.

U bilo kom datom momentu neki molekuli se kreću u jednom pravcu, a drugi u drugom; neki idu brzo, dok drugi to čine sporo; poneki mogu biti čak u mirovanju. Ukupan efekat ovih raznih brzina odgovara temperaturi gasea. U svakoj znatnijoj količini gasea ima toliko mnogo molekula da se saglasno »zakonima verovatnoće« može naći neka prosečna brzina koja bi, ako bi je svaki molekul gase posedovao, proizvela isti efekat pri dатој temperaturi kao što je onaj koji proizvodi ukupan zbir raznih brzina.

Poznato je da se za povećanje temperature neke materije zahteva energija. Prema tome, može se uzeti da je temperatura gase direktno proporcionalna srednjoj kinetičkoj energiji gasnih molekula. Treba shvatiti da ova srednja brzina mora biti takva da datom broju molekula određene mase daje istu kinetičku energiju koju bi davale njihove različite pojedinačne brzine.

ATMOSFERSKI PRITISAK

Gas koji je od vitalnog značaja za let projektila jeste vazduh. Masa vazduha koja okružava Zemlju, a za ovu je drži gravitaciona privlačna sila, vrši pritisak na Zemljinu površinu koji je jednak:

$$p = hdg$$

gde je h visina vazdušnog sloja, d gustina vazdušnog sloja, a g gravitaciona privlačna sila Zemlje.

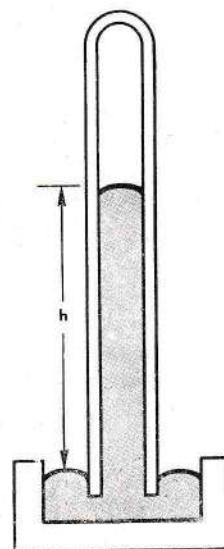
Ovaj atmosferski pritisak može se meriti na nekoliko načina. Obični laboratorijski metod koristi se živim stubom (barometrom).

Živa se sastoji od staklene cevi dužine oko 34 palca (85 cm), koja je na jednom kraju zatvorena pa zatim potpuno napunjena životinjom i obrnuta stavljena u otvorenu čašicu koja je delimično napunjena životinjom, kao što pokazuje slika uz ovaj tekst.

Živa se u cevi nešto spusti, ostavljajući gore prazan prostor. Visina životinog stuba (h) služi kao pokazatelj atmosferskog pritiska.

Na površini mora, a pri temperaturi od 0°C , visina životinog stuba je 76 cm ili oko 30 palaca, što predstavlja pritisak od 14,7 funti na kvadratni palac ($1,03 \text{ kg/cm}^2$). Stub od 30 palaca (760 cm) upotrebljava se kao standardni etalon.

Na većim visinama atmosferski pritisak na površinu žive u otvorenoj čašici je manji nego na morskom nivou; zbog toga se živa u cevi spusti niže. Ove promene u visini životinog stuba predstavljaju promene atmosferskog pritiska prema kojima se može određivati visina u odnosu na nivo mora.



Sl. 115 — Živin stub za merenje atmosferskog pritiska

Druga sprava koja se upotrebljava za merenje atmosferskog pritiska jeste aneroid-barometar, slika 116. Ovaj barometar sastoji se od male zatvorene metalne kutije koja je delimično ispraznjena i ima jednu stranu ili jedan kraj od tankog talasastog metala. Ovaj se tanki metal ugiba ili izdiže s promenom pritiska na njegovu spoljnu površinu. To se pomeranje prenosi sistemom poluga na kazaljku koja je tako nameštena da se kreće iznad skale sa podelima bilo u funtama na kvadratni palac ili kvadratnu stopu (kg/cm^2), da bi označila visinu koja odgo-

vara pokazanom pritisku. Ova sprava se upotrebljava na avionskim visinomerima, a isto tako i kao krajnji instrument ili prenosnik u telemetrijskim sistemima za pribavljanje podataka koji se odnose na pritisak u visini.

Atmosferski pritisak se ne menja ravnomerno sa visinom. On se menja brže na manjim visinama zbog gustine vazduha koja čini da gornje vazdušne mase sabijaju one blizu Zemljine površine. Ovakav efekat delimično se smanjuje protivdejstvom gornjih slojeva koje je posledica hlađenja tih slojeva. Hlađenje teži da poveća gustinu.

Visina se može približno odrediti na osnovu poznavanja atmosferskog pritiska koji joj odgovara. Kad se uračunaju potrebne popravke zbog vlažnosti, gustine, temperature i drugih promenljivih činilaca, onda se barometarskim visinomerom mogu dobiti prilično tačni rezultati.

Atmosferski pritisci su vrlo veliki, ali u većini slučajeva na sve strane predmeta deluje praktično isti pritisak, tako da nijedna od njih nije izložena većem teretu. Da bi se na primeru uvidelo koliki je atmosferski pritisak koji može postojati na nekoj površini, treba pogledati pritisak na čelo obične katodne cevi od 5 palaca (127 mm), koja se upotrebljava na oscilografima. Na nivou mora pritisak na čelo te cevi je oko 300 funti (135 kg). Ekran normalne pravougaone televizijske cevi od 17 palaca (432 mm), na morskom nivou trpi pritisak od skoro 2400 funti (1080 kg).

Sila koju stvara atmosferski pritisak izračunava se po obrascu:

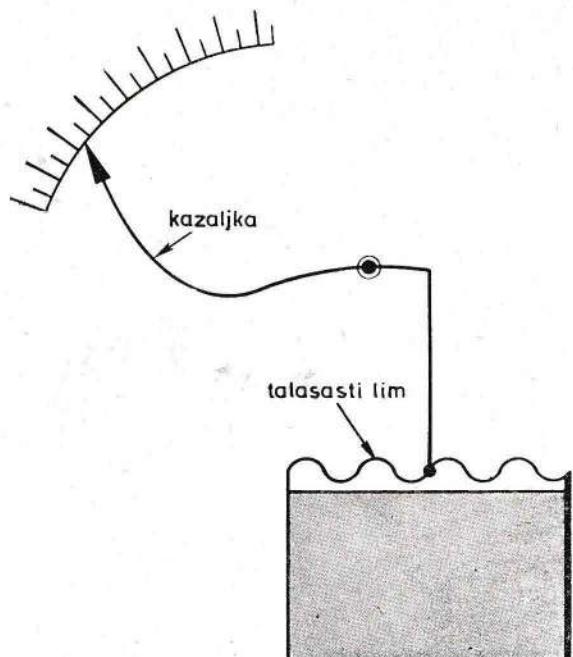
$$F = pA,$$

gde je F ukupan pritisak na površinu, p atmosferski pritisak po kvadratnom palcu (u kg/cm^2), pod određenim uslovima visine i gustine, a A veličina površine u kvadratnim palcima (cm^2).

SABIJENOST GASOVA

Sabijenost je značajna osobina gasova. Prost odnos između pritiska gasa i njegove zapremine izražen je Bojlovim (Boyle) zakonom koji kaže da »zapremina zatvorenog gasa stoji u obrnutoj сразмерi sa apsolutnim pritiskom, pod pretpostavkom da temperatura ostaje nepromenjena«.

Ovaj zakon može se dokazati ako se izvesna količina gasa zatvori u cilindar koji ima potpuno hermetičan klip. Zatim se na klip deluje silom tako da se gas u cilindru sabije do određene zapremine. Kad se ta sila udvostruči, gas će se, kao što je pokazano na slici 117, sabiti na polovinu prvobitne zapremine.



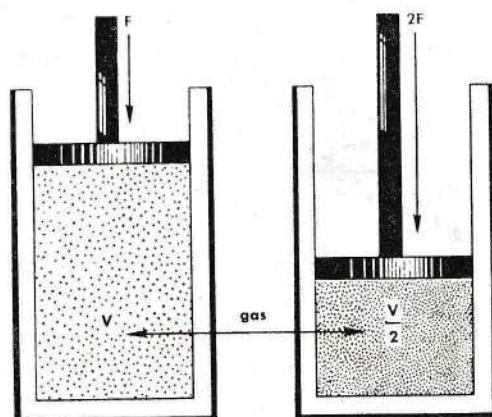
Sl. 116 — Aneroid — barometar

Ako su » p_A « i » V_A « pritisak i zapremina pod jednom kombinacijom uslova, a » p_B « i » V_B « pod drugom kombinacijom uslova, onda je:

$$V_A : V_B = p_B : p_A$$

$$p_A V_A = p_B V_B$$

Gas koji se ponaša saglasno Bojlovom zakonu zove se idealan gas. Kad se pritisak na takav gas povećava, njegova se zapremina smanjuje, a gustina raste. Iz toga izlazi da je gustina gasa upravo сразмерna pritisku, ako temperatura, kao i u slučaju idealnog gasa, ostaje nepromenjena. Gustina se takođe menja s temperaturom, pošto se gasovi šire kad se zagrevaju, a skupljaju kad se hlade.



Sl. 117 — Gas sabijen dvostrukom silom na polovicu njegove zapremine

Specifična težina gasa računa se u odnosu na vazduh. Zbog toga je težina vazduha tačno određena. Jedan litar (1000 kubnih santimetara) vazduha na temperaturi 0°C i pritisku 760 mm živinog stuba teži 1,293 grama. Prema tome, gustina vazduha pod normalnim uslovima iznosi 0,081 funte po kubnoj stopi ($0,001293 \text{ g/cm}^3$).

Deljenjem gustine gasa gustom vazduha iznalaže se specifična težina gasa. Sledeća tablica pokazuje gustinu i specifične težine nekih gasova:

GAS	GUSTINA g/litar funta/kub. stopa	SPECIF. TEZINA
Vazduh 0°C 760 mm	1,293	0,081
Vazduh 20°C	1,205	0,0755
Para 100°C	0,598	0,037
Vodonik	0,090	0,0056
Helijum	0,179	0,011
Azot	1,251	0,078
Kiseonik	1,429	0,089
Ugljen-dioksid	1,977	0,123
		1,529

DALTONOV ZAKON

Ako se smeša dva gasa ili više gasova koji se hemijski ne spajaju stavi u jedan sud, svaki se gas širi kroz ceo prostor, a absolutni pritisak svakog gasea smanjuje se na nižu vrednost zvanu *delimični pritisak*. To je smanjivanje u skladu sa Bojlovim zakonom. Pritisak pomešanih gasova jednak je zbiru delimičnih pritisaka. Ovu činjenicu otkrio je Dalton, engleski fizičar, a formulisana je u Daltonovom zakonu koji kaže da »smeša nekoliko gasova koji međusobno hemijski ne reaguju vrši pritisak jednak zbiru pritisaka koji bi ti gasovi vršili pojedinačno ako bi svaki mogao da zauzme ceo prostor sam pri datoj temperaturi i u istoj zapremini sa kojom je prisutan u smeši«.

Avogadrov zakon. Italijanski fizičar Avogadro stvorio je teoriju prema kojoj »na istoj temperaturi i pritisku, jednake količine raznih gasova sadrže isti broj molekula«. Ova teorija je proverena eksperimentom i nađeno da se slaže sa kinetičkom teorijom. Danas je poznata kao Avogadrov zakon.

VISKOZNOST

Druga zajednička osobina gasova i tečnosti jeste *viskoznost*, koja se definiše kao *otpor tečenju*. Viskoznost nastaje usled trenja molekula i manje je izražena kod gasova nego kod tečnosti zahvaljujući većem prostoru između molekula gasova.

No, viskoznost gasova primetno usporava njihovo tečenje kroz creva i cevi, a isto tako usporava prolazak drugih tela kroz gas u miru. Povećanje temperature gasea povećava njegovu viskoznost usled povećanja brzine kretanja njegovih molekula.

Viskoznost se može smatrati rezultantom *kohezije* i *adhezije*. Kohezija je molekularna privlačna sila koja teži da sjedini sve čestice tela. Adhezija je molekularna privlačna sila koja se ispoljava između površina tela koja su u dodiru. Da bi se smanjio uticaj trenja vazduha i na taj način povećala brzina vazduhoplova, aeroprofilima se daje strujni oblik.

Sve pojave u vezi s gasovima koje su pomeneute u ovom odeljku i zakoni kojima se one pokoravaju moraju se uzimati u obzir pri projektovanju vazduhoplova kako s tačke gledišta konstrukcije tela, tako i s tačke gledišta goriva. Konkretna primena mehanike gasova detaljno se razmatra u drugim glavama ovog priručnika, u vezi sa stvarima o kojima se u njima govori.

KRATAK ZAKLJUČAK

Treba zapamtiti da je inercija osobina materije kojom ona teži da ostane u miru, ili, ako se kreće, da produži kretanje istim pravcem sve dok, u oba slučaja, na nju ne počne delovati neka spoljna sila.

Vektor brzine predstavlja brzinu i određeni pravac kretanja. Ugaona brzina odnosi se na promenu pravca predmeta koji se kreće. Ubrzanje je promena brzine u vremenu. Ono predstavlja kretanje pri kojem se brzina menja od tačke do tačke.

Centrifugalna i centripetalna sila mogu se ilustrovati na primeru lopte vezane za konac. Kad se, držeći za kraj konca, lopta vrti, ona vuče u spoljnju stranu, delujući centrifugalnom silom na konac. Centrifugalna sila čini da se konac zateže. Konac tada ispoljava silu koja vuče unutra, to je centrifugalna sila.

Ugaono ubrzanje se stvara momentom sile. Momenat je obrtni efekat kome se podvrgava telo, a meri se proizvodom sile koja deluje na telo i upravnog odstojanja od osovine obrtanja do pravca dejstva sile.

Kad se od tela zahteva kretanje dvema ugaonim brzinama oko posebnih osovina, proizvodi se ugaono kretanje oko neke treće osovine. To novo kretanje zove se precesija. Pojava precesije ilustruje rad žiroskopa.

Tela koja se kreću poseduju kinetičku energiju zahvaljujući svom kretanju. Telo može imati potencijalnu energiju koja potiče od nje-

govog položaja; telo poseduje potencijalnu energiju kad je u takvom položaju iz kojeg može da vrši rad.

Za telo koje produžava da miruje kaže se da je u statičkoj ravnoteži. Ravnoteža tela zavisi od dva uslova. Prvi uslov zahteva da vektorska suma svih sila koje deluju na telo bilo kojim pravcem bude jednaka nuli. Drugi uslov ravnoteže zahteva da momenti sila koje deluju na telo budu uravnoteženi.

Harmonijsko kretanje se definiše kao vibraciono kretanje pri kojem su ubrzanje vibrirajućeg tela i restorirajuća sila koja deluje na telo srazmerni momentanoj udaljenosti tela od srednje tačke njegove putanje, a imaju pravac

ka toj tački. Kretanje klatna tamo-amo opisuje harmonijsko kretanje.

Treba zapamtitи da gasovi imaju visoko svojstvo sabijanja i da teže da potpuno ispune bilo koji zatvoren i sud u koji se mogu staviti. Povećavanjem brzine isticanja gasa smanjuje se njegov pritisak i obratno. Temperatura utiče na pritisak koji gas vrši na zidove zatvorenog suda. Povećanje temperature ima za rezultat povećanje brzine kretanja molekula, što povećava pritisak. Ovo ponašanje poznato je pod imenom kinetičke teorije gasova.

I optika, ili nauka o svetlosti, je važna za raketnu tehniku. O njoj se raspravlja u sledećem odeljku.

OPTIKA KOJA SE KORISTI ZA FUNKCIONISANJE VOĐENOG PROJEKTILA

Neki sistemi za navigaciju i samonavođenje koji se koriste u savremenim raketama zasnuvaju se na ponašanju i fenomenima svetlosti ili nekih oblika energije zračenja koji imaju karakteristike slične karakteristikama svetlosti. Primeri takvih sistema su sistemi za samonavođenje koji rade na principu *topltnog* ili *svetlosnog kontrasta* i sistem za automatsku astrovavigaciju.

Da bi se svojstva svetlosti ili energije zračenja mogla koristiti u raketnim sistemima, potrebno je da se energije zračenja pretvore ili izmene u takav oblik energije koji je pogodan za pokretanje ili kontrolisanje mehaničkih ili električnih delova koji se upotrebljavaju za vođenje i upravljanje projektilima. Ovo se pretvaranje ostvaruje uglavnom upotrebom optičkog sistema zajedno sa električnim i mehaničkim uredajima koji služe za upravljanje letom projektila ili za određivanje njegove pozicije. Pre svega, neophodno je da se poznaje način na koji se izvori svetlosti ili energije zračenja koriste kao orijentacione tačke u sistemima za samonavodjenje i navigaciju.

Da bi se olakšalo razumevanje teorije i rada sistema za samonavođenje i navigaciju, neophodno je da se u izvesnoj meri poznaju svojstva svetlosti i energije zračenja.

Savremena teorija smatra da se svetlost, kako vidljiva tako i nevidljiva, sastoji od *kvanta* (paketa) energije koji se kreću u obliku talasa. Statističko ponašanje kvanta zavisi od pretpostavke da je energija kvanta u bilo kojoj tački u prosjeku jednaka intenzitetu talasnog sistema u toj tački.

Ova *talasna teorija* svetlosti pretpostavlja da se svetlost prenosi od svetlećih tela (tela koja emituju svetlost) do oka i drugih predmeta

pomoću talasnog ili treperećeg kretanja. Brzina tog prenošenja je oko 300.000 km u sekundi, a treperenja *etera* (medijuma koji u prostoru provodi svetlost) upravna su na pravac kretanja talasa. Ovi talasi variraju po dužini od oko 3,85 do 7,60 desetohiljaditih delova milimetra.

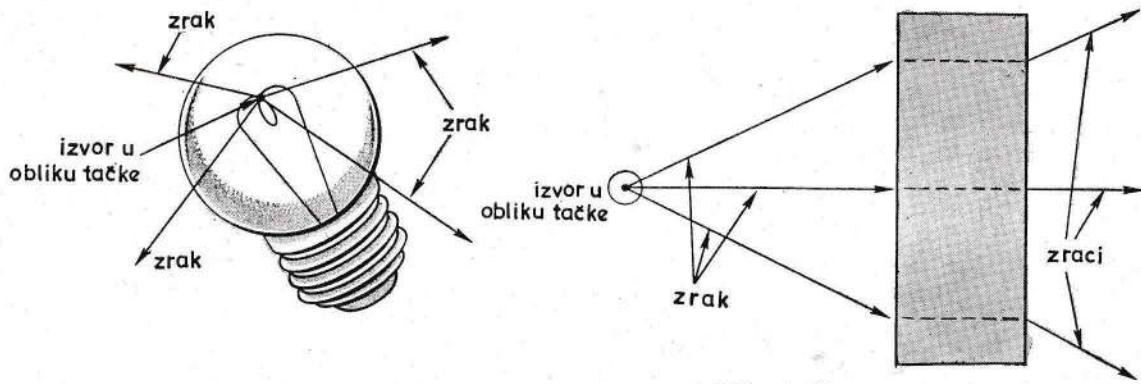
Uticak o *boji*, koji se stvara kad svetlosna energija udari o mrežnjaču oka, varira na veoma složen način, zavisno od dužine talasa, amplitude treperenja i raznih drugih činilaca i uslova od kojih neki prelaze okvir ovog priručnika.

Talasi sličnog karaktera, ali čije su dužine iznad ili ispod maločas pomenutih granica, nisu primetni za prosečno oko pod normalnim uslovima. Vrlo kratki talasi dužine između 1,0 i 3,85 desetohiljaditih delova milimetra čine *ultravioletnu* svetlost; oni su poznati po svom fotografskom i drugom hemijskom dejstvu. Talasi duži od 7,60 desetohiljaditih delova milimetra zovu se *infracrveni* talasi; oni se otkrivaju svojim termalnim (topltnim) dejstvima.

Prema elektromagnetskoj teoriji svetlosti, koju je izložio engleski fizičar Maksvel (*Maxwell*), ti talasi su, uključujući i talase prave svetlosti, iste vrste kao talasi pomoću kojih se elektromagnetske oscilacije rasprostiru kroz eter i svetlost je elektromagnetski fenomen.

Najvažnije svetlosne pojave su odbijanje, prelamanje, rasipanje, interferencija i polarizacija. Jedna svetlosna pojava, ili više takvih pojava, deluje preko pogodnog optičkog sistema kao medijuma u cilju samonavođenja ili navigacije projektila; zato će se ova glava pozabaviti upravo njima.

Pre nego što pristupimo proučavanju optike, treba da je definisemo. Optika je nauka o svetlosti — o njenom postanku i širenju; efektima



Sl. 118 — Svetlosni zraci od izvora u obliku tačke

kojima se izlaže i onima koje stvara, kao i o drugim pojavama koje imaju veze s njom. *Geometrijska optika* se bavi optičkim pojavama povezanim s odbijanjem i običnim prelamanjem zrakova, ali samo utoliko ukoliko se mogu matematički izvesti iz prostih zakona odbijanja do kojih se došlo na osnovu posmatranja i opita. *Fizička optika* se bavi opisom i objašnjavanjem svih optičkih pojava pomoću fizičkih teorija, kao što su opšta talasna teorija, elektromagnetskih pojava, kvantna mehanika i teorija o drugim svojstvima svetlosti.

Jedna od misterija vezanih za energiju zračenja u vidu svetlosnih, topotnih i elektromagnetskih talasa jeste pitanje medijuma koji provodi tu energiju. Jedino po tome što apsorbuje energiju i menja je u neki drugi oblik mi smo u stanju da ustanovimo postojanje tog medijuma i odredimo njegove osobine. Kao što je ranije rečeno, za označavanje medijuma čijim se posredstvom rasprostire energija zračenja upotrebljava se reč eter. Ali se zna šta je u stvari medijum.

Najuočljivije osnovno svojstvo svetlosti jeste da se ona prilikom prolaska kroz homogenu sredinu (jednoobrazno po gustini i sastavu) prostire po pravim linijama. Pravolinijsko prostiranje svetlosti služi kao osnova shvatanja da je svetlosni zrak prava putanja u homogenoj sredini duž koje se svetlost prostire ili prenosi.

Prema tome, svetlosni zrak se može predstaviti ako se na svetlećem telu izabere jedna tačka i od nje nacrti prava linija u pravcu prostiranja svetlosti. Kao što je pokazano na slici 118, iz svetlosnog izvora u obliku tačke može se povući bezbroj zrakova. Taj skup zrakova, ili konus svetlosti, zove se *snop zrakova*. Dva zraka iz takve grupe dovoljna su da se prostom geometrijskom konstrukcijom odredi mesto svetlosnog izvora. Mesto izvora je tačka preseka linija povučenih duž putanja zrakova.

JEDINICE JAČINE SVETLOSTI

Jačina ili sjajnost svetlosti predstavlja stepen u kojem je vidljiva svetlost prisutna u energiji zračenja koju izvor emituje.

Mrežnjača čovečijeg oka je osjetljiva na srazmerno malu količinu energije zračenja koju emituje usijano telo; zbog toga, da bismo izmernili relativnu jačinu vidljive svetlosti, moramo upotrebiti etalone i postupke koji su naročito podešeni za vidljivu svetlost. To standardi i postupci sačinjavaju nauku koja se zove *fotometrija*.

Svetlost se može smatrati kao tok energije zračenja ili *svetlosni fluks* (izražen u ergovima u sekundi). Zbog razlika u osjetljivosti čovečijeg oka na različite boje (različite talasne dužine svetlosti), svetlosni fluks se ne može vizuelno meriti u ergovima u sekundi. Umesto erga za tu se svrhu mora upotrebiti jedinica zvana *lumen*.

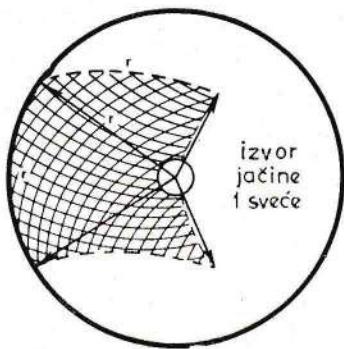
Lumen je količina svetlosnog fluksa koju zrači izvor jačine jedne sveće kroz prostrani ugao tolike veličine da se obuhvati jedinica površine na jedinici odstojanja od izvora.

Svetlosni fluks označava količinu svetlosne energije koju jedan izvor emituje, procenjujući na osnovu njenog vizuelnog efekta.

Ako se zamisli da je izvor svetlosti jačine jedne sveće smešten u geometrijskom centru šuplje lopte poluprečnika 1 m, onda svaki kvadratni metar unutrašnje površine lopte prima lumen svetlosti. Pošto u ovom slučaju ukupna površina lopte iznosi (4π) m², to je ukupna svetlost koju emituje izvor jačine jedne sveće jednak 4 π lumena. Slika 119 ilustruje ovaj primer.

Svetlost izvora jačine jedne sveće, koja pada na jedinicu površine na jedinici odstojanja, predstavlja jedan lumen.

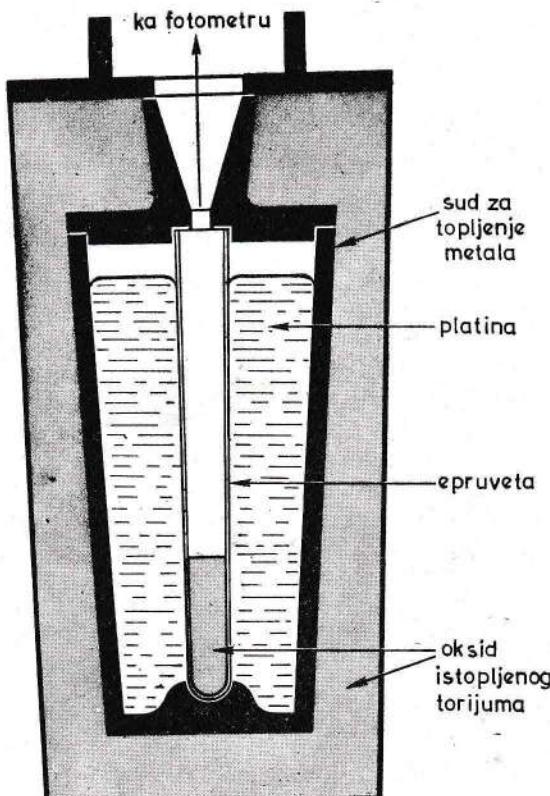
Većina svetlosnih izvora ima u raznim pravcima različitu jačinu svetlosti. Prosečna jačina



Sl. 119 — Svetlost koja pada na površinu r^2 udaljenu od izvora jačine 1 sveće za veličinu » r « jednaka je 1 lumenu

izražena u svećama, koja se dobije na osnovu merenja u raznim pravcima oko svetlosnog izvora, zove se *srednja sfera jačina svetlosti*. Prema tome, ako izvor koji ima srednju sferu jačinu svetlosti od jedne sveće emituje 4π lumeni svetlosnog fluksa, onda se ukupan fluks (F) u lumenima koji emituje izvor srednje sfere jačine svetlosti (I_0) može izraziti jednačinom $F = 4\pi I_0$.

Osnovni etalon za jačinu svetlosti, koji je izradio Nacionalni biro za standarde, sastoji se



Sl. 120 — Ured za mere. Jedinica za jačinu svetlosti

od jarko svetlećeg komada platine, čija je temperatura jednaka temperaturi stvrdnjavanja (2042° Kelvin, 1773° Celzijusa), a ima izgled prikazan na slici 120. Platina se nalazi u sudu za topljenje metala koji je izrađen od rastopljenog torijumovog oksida ili kvarca i obložen materijalom koji izoluje topotu. Ovaj uređaj namesti se u naizmenično magnetno polje, pa se platina u sudu topi pomoću struje koja se u njemu indukuje. U istopljenu platinu stavi se epruveta od rastopljenog kvarca ili torijumovog oksida koja sadrži izvesnu količinu torijumovog oksida u vidu finog praška i služi kao zračeće »crno telo«. Jačina svetlosti u epruveti u momentu kad metal, hlađeći se polako, dostigne temperaturu na kojoj prelazi u čvrsto stanje, uzima se da iznosi 60 sveće po kvadratnom centimetru. Prema tome, nova *standardna sveća* jednaka je šezdesetom delu svetlosne jačine jednog kvadratnog centimetra šupljeg suda na temperaturi na kojoj platina prelazi u čvrsto stanje. Ova jačina je nešto manja od jačine stare *internacionalne sveće*.

Količina svetlosnog fluksa koja pada na jednu površinu i veličine te površine određuju zajedno stepen osvetljenosti. Osvetljenost je jednoobrazna samo kad se upotrebri jedan svetlosni izvor i kada su sve tačke osvetljene površine podjednako udaljene od izvora.

Jačina svetlosti od jednog lumena na $1 m^2$ zove se metarsveća. To je količina osvetljenja koju prima površina koja je od standardne sveće udaljena 1 m. Osvetljenost površine izražava se brojem lumeni na jedinicu površine, dakle:

$$E = \frac{I}{d^2}$$

gde je » E « ukupna osvetljenost, » I « jačina svetlosnog izvora u svećama, a » d « udaljenost od tog izvora do površine.

Ako se uzme da površina veličine » A « prima ukupni svetlosni fluks » F «, onda se osvetljenost površine može izraziti u lumenima na jedinicu površine, tj. kao lumeni na kvadratni metar, dakle:

$$\frac{F}{A}$$

Stepen osvetljenosti date površine koju stvara neki svetlosni izvor zavisi od jačine izvora i njegove udaljenosti od površine, s tim da svetlosni zraci prolaze kroz jednoobrazni medijum i padaju upravno na površinu.

Povećanje jačine izvora proizvodi srazmerno povećanje svetlosnog fluksa koji pada na površinu. Povećanje udaljenosti površine od iz-

vora smanjuje osvetljenost površine za veličinu koja je srazmerna kvadratu udaljenosti. To jest, udvostručavanje udaljenosti između svetlosnog izvora i osvetljene površine smanjiće osvetljenost na jednu četvrtinu prvobitne vrednosti.

Ovaj je efekt zajednički svim oblicima energije zračenja, a iskazuje se *zakonom obratnog kvadrata* koji kaže da je »gustina zračećeg fluksa na bilo koju površinu obratno srazmerna kvadratu udaljenosti te površine od izvora zračenja«.

Brojna vrednost osvetljenosti identična je, bez obzira na to da li se izražava u stopama, svećama ili u lumenima na kvadratni metar.

Jednačina

$$E = \frac{I}{d^2}$$

se može upotrebiti za računanje osvetljenosti samo kad je površina sfernog oblika i kad se izvor zračenja nalazi u njenom središtu. Ovaj je uslov poznat kao *normalna osvetljenost*.

Za male površine, čija je udaljenost od izvora u poređenju s njihovim dimenzijama velika, navedena formula može se upotrebiti s malom greškom. Iznad velikih površina kod kojih sve linije fluksa nisu na njih upravne difuzija svetlosti nije jednoobrazna. Jačina fluksa smanjuje se u tačkama koje su udaljenije od izvora za veličinu koja je srazmerna kosinusu upadnog ugla; prema tome, ovaj se činilac mora uzeti u obzir prilikom računanja. U ovim slučajevima formula:

$$E = \frac{I \cos i}{d^2}$$

je mnogo tačnija. No, čak i za upotrebu ove formule, dimenzije površine moraju biti srazmerno male u odnosu na udaljenost od izvora.

Sve dovdje razmatrana je svetlosna jačina izvora u vidu tačke; prema tome, kad se pređe na svetlosne jačine izvora većih površina, koje se mogu same osvetljavati ili ne, onda da bi se označile svetlosne jačine jedinačnih površina, mora se upotrebljavati količina *sjajnosti*. Sjajnost se definiše kao svetlosna jačina jedinične površine u datom pravcu. Sjajnost se izražava brojem sveća na jedinicu površine, a obično se izražava u kvadratnim santimetrima.

Razlika između sjajnosti i osvetljenosti može se ilustrovati posmatranjem na primer, ove stranice knjige. Ona je jednoobrazna osvetljena (ili bar približno jednoobrazno), ali štampana slova manje odbijaju svetlost koja na njih pada, pa su zato manje sjajna nego beli papir na kome su ona štampana.

Sjajnost površine i osvetljenost površine bili bi brojno jednak samo ako bi površina odbila svu svetlost koja na nju padne. Donja tablica pokazuje približne vrednosti sjajnosti nekih poznatih samoosvetljavajućih ili tamnih tela.

Sunčev disk	153 000 000 sv/st ² (164.700 sv/cm ²)
Krater pozitivnog ugljena plamene lampe	14 000 000 sv/st ² (15 180 sv/cm ²)
Sijalična nit od tungstena .	465 000 sv/st ² (510 sv/cm ²)
Mesečev disk	465 sv/st ² (0,51 sv/cm ²)
Jasno plavo nebo	370 sv/st ² (0,4 sv/cm ²)
Novine	1,8 sv/st ² (0,02 sv/cm ²)

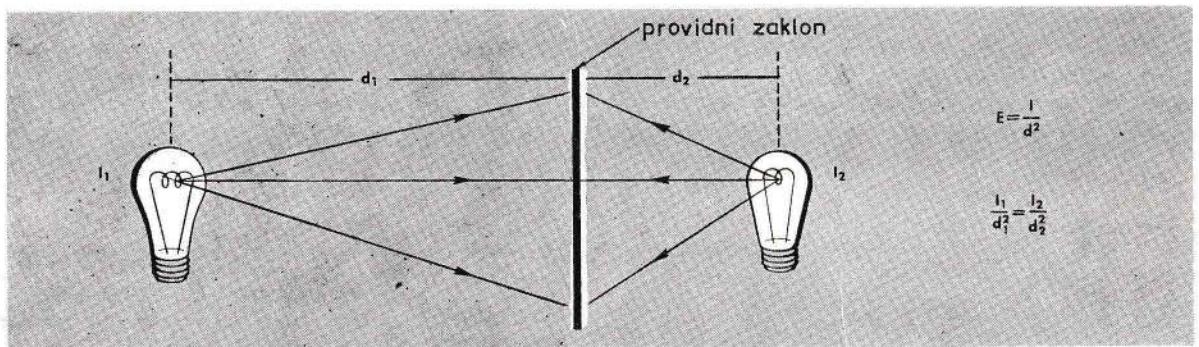
Sl. 121 — Sjajnost nekih poznatih predmeta

Sjajnost površine obično zavisi od pravca iz kojeg se površina posmatra, ali postoje neki materijali koji tako rasipaju svetlost da je njihova sjajnost ista bez obzira na to odakle se gleda. Primeri takvih materijala su oksid magnezijuma i tek pao sneg. Za površine ove vrste upotrebljava se jedinica za sjajnost zvana *lambert*.

Lambert predstavlja sjajnost savršeno rasipajuće površine koja šalje ili razbacuje svetlost od jednog lumena na kvadratni santimetar. Kad je odbijena svetlost manja od svetlosti koja je pala, sjajnost u lambertima jednaka je proizvodu osvetljenosti i koeficijenta odbijanja svetlosti materijala od kojeg je površina načinjena.

MERENJE JAČINE SVETLOSTI

Relativne jačine dva svetlosna izvora ili više takvih izvora nisu primetne za čovečije oko ako se određuju neposrednim posmatranjem, ali se može tačno odrediti da li su dve površine koje se nalaze jedna pored druge podjednako osvetljene. Podešavanje da osvetljenost dve susedne površine bude ista jeste osnovni princip *foto-metra*, sprave koja se sastoji od dve lampe postavljene na izvesnom rastojanju jedna od druge i jednog zaklona koji je namešten između njih. Svaka strana zaklona osvetli se upravnom svetlošću jednog izvora, to jest tako da fluksne linije svakog izvora budu u svim tačkama upravne (ili približno upravne) na površinu zaklona. Zaklon se pomera duž fluksne linije između izvora sve dok se ne zapazi da su obe njegove strane podjednako osvetljene. Zatim se izmere



Sl. 122 — Fotometar je primer praktične primene zakona obratnog kvadrata

rastojanja između lampi i njihovih odnosnih strana zaklona. Iz jednačine:

$$E \frac{I}{d^2}$$

može se postaviti proporcija:

$$\frac{I_1}{d_1^2} = \frac{I_2}{d_2^2}$$

gde su I_1 i I_2 svetlosne jačine lampi u svećama, a d_1 i d_2 njihova odnosna rastojanja od zaklona. Prema tome, ako je poznata vrednost ili I_1 ili I_2 , onda se može lako izračunati vrednost druge. Slika 122 ilustruje primenu zakona obratnog kvadrata u gore navedenom računu.

Ako je nađeno da je rastojanje d_1 dva puta veće od vrednosti d_2 i ako I_2 predstavlja izvor jačine 16 sveća, jačina I_1 mora biti četiri puta veća od I_2 da bi se proizvela ista osvetljenost providnog zaklona.

$$\text{Pošto je: } \frac{I_1}{d_1^2} = \frac{I_2}{d_2^2}$$

prema tome, ako je d_1 dva puta koliko d_2 i I_2

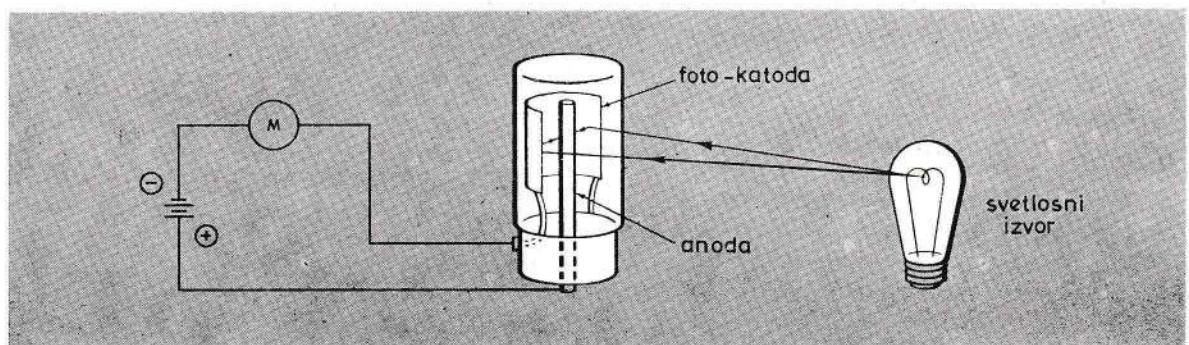
ima vrednost 16 sveća, onda ova jednačina glasi:

$$\frac{I_1}{2^2} = \frac{16}{1^2}$$

Dakle, I_1 je jednako četiri puta $16 = 64$ sveće.

Ovaj metod računanja jačine jednog svetlosnog izvora u odnosu na drugi daje zadovoljavajuće rezultate kad su oba izvora iste boje. Ako lampe nisu iste boje, onda je potreban drugi metod. Lampe različitih boja mogu se upoređivati sa standardnom lampom menjanjem potencijala na toj lampi. Smanjivanje potencijala stvara primetno žuču boju; povećanje potencijala povećava belinu boju.

Drugi način upoređenja lampi različitih boja sastoji se u upotrebi tzv. *treperećeg fotometra* koji koristi rotirajuću prizmu. Ova rotirajuća prizma omogućava da posmatrač vidi naizmenično, u kratkim vremenskim razmacima, jednu pa drugu stranu zaklona. Nakon izvesnog povećanja učestanosti ove naizmenične pojave strana, naći će se vrednost pri kojoj nestaje treperenje zbog razlike u boji. Tada izgleda kao da su se obe boje slile u jednu. No, ako učestanost nije dovoljno velika, ostaje treperenje zbog razlike u osvetljenosti. Tada se zaklon fotometra



Sl. 123 — Fotoćelija upotrebljena za merenje jačine svetlosti

pomera dok ovo treperenje takođe ne iščezne. Zatim se lampe mogu upotrediti na običan način.

I fotoelektrične čelije sa pogodnim svetlosnim filterima mogu se upotrebiti za upoređenje jačine lampe ili drugih svetlosnih izvora različitih boja. Pošto je fotoelektrična struja srazmerna stepenu osvetljenosti fotokatode, jačina lampe koja se ispituje može se naći upoređenjem jačine struje koju ona proizvodi sa jačinom struje koju proizvodi proverena standardna lampa. Slika 123 pokazuje kako se foto-čelija može iskoristiti za ovu svrhu.

Svetlost od izvora (lampe itd.) pada na katodu čelije premazanu nekom materijom koja je osetljiva na svetlost. Ova materija oslobođa ili emituje elektrone kad na nju padnu svetlosni zraci koji dolaze spolja. Elektrone privlači anoda koja je vezana sa pozitivnim polom pogodne baterije. Galvanometar vezan u seriju sa katodom, anodom i materijom, registruje povećanje jačine struje stvorene svetlošću koja dolazi spolja. Između izvora i katode mogu se postaviti filtri da bi se dopustilo da do katode dospire samo svetlost željene talasne dužine (boje).

Pri izboru orijentacionih zvezda za sisteme koji se upotrebljavaju u astronavigaciji, nas u prvom redu interesuje jačina svetlosti samo u jednom pravcu. Fotometrijske sprave koje su pomenute u prethodnim odeljcima mogu se adaptirati za primenu u tu svrhu.

BRZINA SVETLOSTI

Raniji eksperimenti koji su imali za cilj da odrede brzine svetlosti davali su netačne rezultate, jer se pri radu s opremom koja se upotrebljavala za te eksperimente gubilo vreme. Međutim, nedavna posmatranja pri kojima su upotrebljeni poboljšani optički instrumenti i elektronski hronometri znatno su smanjili grešku. Sada se smatra da brzina svetlosti iznosi 299 776 km/s. U približnim računima uzima se da je brzina svetlosti ili dužina radio-talasa 300 000 000 m/s.

Savremeni metodi računanja brzine svetlosti obično upotrebljavaju nekoliko izmenjenu verziju načina pomoći rotirajućeg ogledala koji je 1850. primenio francuski fizičar Fuko (*Foucault*). Fukoov način se sastoji u upućivanju uskog snopa svetlosti ka ravnom ogledalu koje se obrće velikom brzinom. Na znatnom odstojanju od rotirajućeg ogledala bilo je namešteno nepomično ogledalo. Ono je primalo trenutni blesak svetlosti i odbijalo ga natrag ka rotirajućem ogledalu od kojeg je zatim blesak ponovo od-

bijen. U vremenskom intervalu koji je potreban da svetlosni snop pređe izmereno odstojanje između rotirajućeg i nepomičnog ogledala i natrag, rotirajuće ogledalo obrnulo se za izvestan ugao.

Iz ugaone brzine rotirajućeg ogledala i odstojanja između ogledala izračunavalo se vreme koje je potrebno da svetlost prevali put od rotirajućeg ogledala do nepomičnog reflektora i da se vrati natrag, pa se zatim na osnovu tih činilaca odredivala brzina svetlosti.

Fukoov način poboljšao je američki fizičar Majkelson (*Michelson*) koji je koristio rotirajuće oktagonalno ogledalo od čije je jedne strane odbijala svetlost izvora velike jačine ka jednom dalekom ravnom ogledalu. Svetlosni zrak koji se vraća od nepomičnog ogledala udario bi u drugu stranu rotirajućeg ogledala od koje bi se onda odbio ka posmatračevom teleskopu.

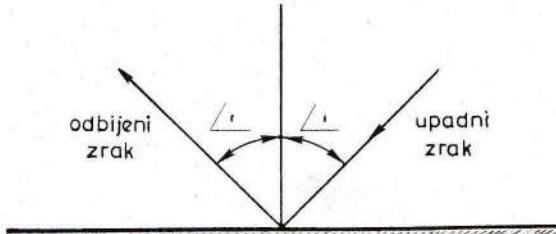
ODBIJANJE I PRELAMANJE SVETLOSTI

Dve najznačajnije pojave geometrijske optike su *odbijanje* (refleksija) i *prelamanje* (refrakcija) svetlosti. Svaka od ovih pojava izraz je izvesnog osnovnog odnosa ili prirodnog zakona i prisutna je u svim optičkim sistemima, kao što su čovečije oko, sočiva, prizme, teleskopi, mikroskopi itd.

ZAKON PRAVILNOG ODBIJANJA

Osnovni zakon pravilnog odbijanja kaže: »Kad se zrak svetlosti odbije od neke površine, onda je odbijeni ugao jednak upadnom uglu; odbijeni zrak, upadni zrak i normala (upravna na odbojnu površinu u tački odbijanja) leže u istoj ravni«. Slika 124 ilustruje ovaj zakon.

normala na površinu



Sl. 124 — Zakon pravilnog odbijanja kaže da je odbijeni ugao (r) jednak upadnom uglu (i)

Utvrđeno je da zakon pravilnog odbijanja važi za slučaj kad se svetlost odbija od međupovršine (zajedničke granice) između dve različite sredine, kao što su vazduh i čvrsta površina. Jedna sredina u ovom slučaju bila je providna (vazduh), a druga (čvrsta) neprovidna.

PRELAMANJE ZRAKOVA

Ako je druga sredina providna, izvesna kolичina svetlosti prolazi kroz nju i prelama se ili savija u pravcu koji je po pravilu drugčiji od pravca upadnih zrakova, ali upadni zraci i dalje leže u istoj ravni u kojoj se nalazi normala na površinu. Stepen za koji se ovo savijanje dešava određuje indeks prelamanja sredine.

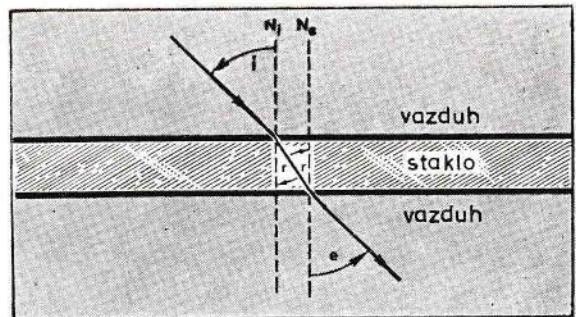
Svaka prelamarajuća sredina ima određeni indeks prelamanja u odnosu na drugu prelamarajuću sredinu, ili, drugim rečima, u bilo kojoj prelamarajućoj sredini između sinusa upadnog ugla i sinusa prelomnog ugla postoji stalni odnos. Oba se ugla mere u odnosu na normalu, liniju koja je u ovom slučaju upravna na odbijajuću površinu u upadnoj i prelomnoj tački.

Prema Snelijusovom (*Snellius*) zakonu, zrak se savija ka normali ako druga sredina ima veći indeks prelamanja nego prva, a od normale ako druga sredina ima indeks prelamanja.

Ugao prelamanja je za neke sredine manji nego za druge. Na primer, ugao prelamanja je manji za staklo nego za vodu, jer je indeks prelamanja stakla veći od indeksa prelamanja vode, pa prema tome teži da prelomljeni zrak savije bliže normali.

Slika 125 ilustruje primere prelamanja. Ona pokazuje kako se svetlosni zrak savija pri prelasku iz jedne sredine u drugu. Leva skica ilustruje prelamanje svetlosnog zraka pri prelasku iz vazduha u staklo, a desna skica ilustruje prelamanje zraka pri prelasku iz stakla u vazduh.

Iz gore rečenog može se zaključiti da će zrak skretati ka normali kad se njegova brzina smanji, a da će odstupiti od normale kad se njegova brzina poveća. Kad zrak prelazi iz jedne sredine u drugu koja teži da smanji njegovu brzinu u većem stepenu nego što je bila smanjena u prvoj sredini, on skreće ka normali. On odstupa od normale ako zrak prelazi iz sredine u kojoj je naišao na veće protivljenje



Sl. 126 — Prolazak svetlosti iz vazduha u staklo i iz stakla u vazduh

(brzina usporena) u sredini u kojoj je susreo manje protivljenje.

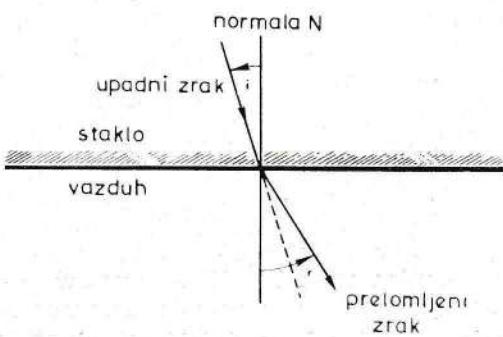
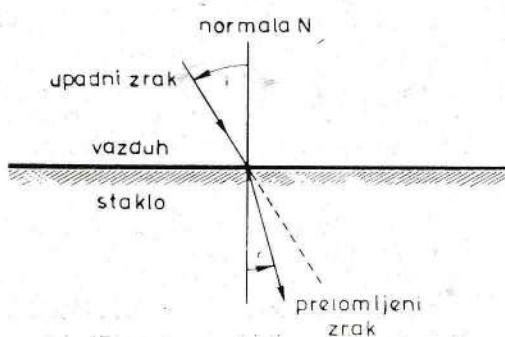
Kao što je gore pomenuto, odnos brzina svetlosti u dvema sredinama koje su u dodiru stalni je za te dve sredine. Rečeno je i da se ovaj odnos zove indeks prelamanja druge sredine u odnosu na prvu. Indeks prelamanja za dve sredine predstavlja se pomoću $M_{1,2}$ (mi 1,2), s redosledom brojki koje pokazuju pravac svetlosnog zraka.

Zakon prelamanja kaže: »Kad se talas kreće koso iz jedne strane u drugu, onda je odnos sinusa upadnog ugla prema sinusu prelomnog ugla isti kao odnos odnosnih talasnih brzina u tim sredinama i stalni je za dve određene sredine«.

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{V_1}{V_2} = M_{1,2}$$

Apsolutni indeks prelamanja jedne sredine jeste njen indeks upoređen sa prelamanjem svetlosti u vakuumu, koje se uzima za jedinicu (1,00). Indeks prelamanja vazduha je tako mali da se on za praktične svrhe upotrebljava kao mera.

Drugi važan fenomen prelamanja na koji će se naići pri proučavanju sistema za astrona-



Sl. 125 — Prelamanje svetlosnih zrakova

vigaciju jeste taj da kad svetlosni zrak prođe kroz jednu sredinu ili više sredina ograničenih paralelnim ravnima (planparalelne sredine), pa opet uđe u prvobitnu sredinu, on će se pomeriti po daljini ali će mu pravac ostati nepromjenjen.

Na slici 126 »i« predstavlja upadni ugao, »r« prelomni ugao, a »e« izlazni ugao svetlosnog zraka koji je prošao kroz planparalelnu ploču, staklo.

Svetlosni zrak, idući iz vazduha kroz planparalelnu ploču i pojavljujući se opet u vazduhu, pokorava se zakonu prelamanja na svakoj površini stakla. Prema tome, uglovi »i« i »r« su jednak, a upadni zrak je paralelan izlazom zraka. Dakle:

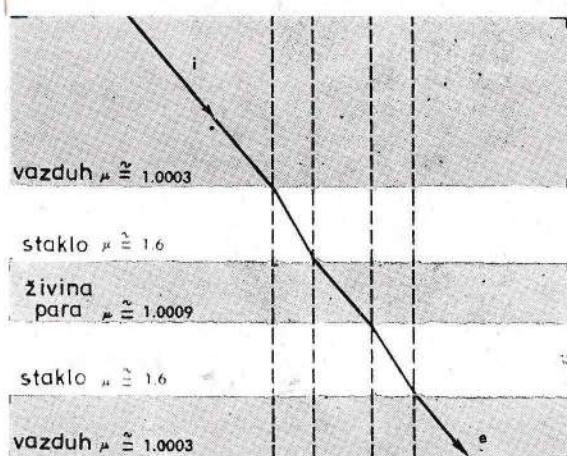
$$M_{vs} = \frac{1}{M_{sv}}$$

Što pokazuje da je indeks prelamanja stakla (s) u odnosu na vazduh (v) jednak recipročnoj vrednosti indeksa prelamanja vazduha u odnosu na staklo.

Kao što je pokazano na slici 127, isti ovi principi važe i za svetlosni zrak koji prolazi kroz više planparalelnih sredina. Slika pokazuje kako se zrak lomio pri prolasku kroz nekoliko planparalelnih sredina. Indeks prelamanja svake sredine označen je na slici.

Potrebno je uočiti na istoj slici da je prelomni ugao u vazduhu ili gasu.

Svetlosni zrak koji ide kroz sredinu s velikim indeksom prelamanja ka sredini s malim indeksom prelamanja, prelama se kao u momentu kad ulazi u drugu sredinu prelomni ugao nije suviše velik. Ako se zrak nagnje pod sve većim uglom, onda će u izvesnom trenutku doći u položaj iz kojeg neće preći u drugu sredinu. Umesto toga, on će se potpuno odbiti od zajedničke površine dveju sredina. Takav uslov poznat je kao *kritični upadni ugao*. Kritični



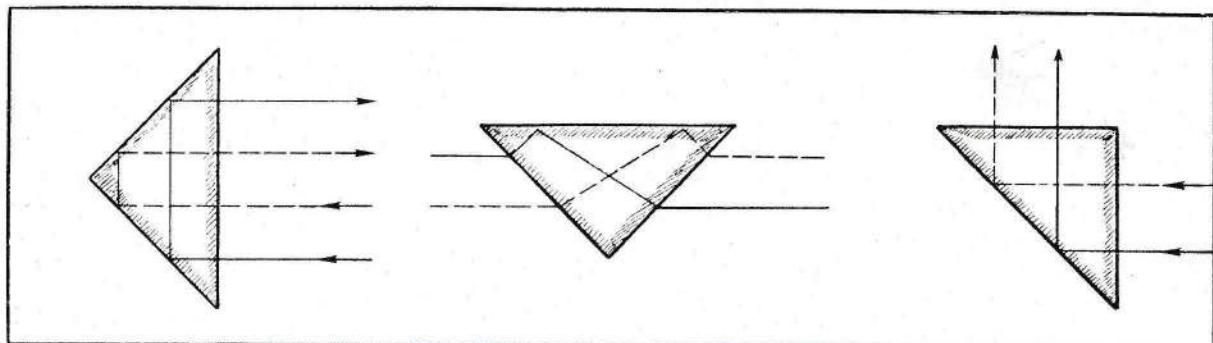
Sl. 127 — Prelamanje svetlosti pri prolasku kroz nekoliko planparalelnih sredina

upadni ugao je maksimalan ugao pri kojem će svetlosni zrak kad udari o površinu neke sredine proći kroz tu sredinu.

Kad se pređe ovaj kritični upadni ugao, zrak okrzne površinu načinivši ugao preloma od 90° , tako da se od nje potpuno odbije. Ovaj se princip često primenjuje u optičkim instrumentima. Kad god se želi da se izbegne upotreba posrebrenih ogledala, za postizanje »potpunog odbijanja« upotrebljavaju se prizme.

U suštini, *prizma* je providno telo delimično ograničeno dvema ravnima koje nisu paralelne. Linija u kojoj se ove ravni sekutivno zove se ivica prizme. O prizmama će se kasnije govoriti detaljnije.

Slika 128 pokazuje tri položaja jedne prizme, koja ima uglove od 45° , na putu svetlosnih zrakova. Prvi položaj pokazuje prizmu koja funkcioniše kao ravno ogledalo nagnuto dole; drugi položaj pokazuje kako prizma obrće sliku; treći položaj pokazuje kako prizma premešta zrake i menja njihove pravce.



Sl. 128 — Prizma koja potpuno odbija svetlost u raznim položajima

Moguće je kompenzirati premeštanje svetlosnog zraka koji prolazi kroz neku materiju. Premeštanje se kompenzira tako što se zrak primorava da posle izlaska iz materije koja ga premešta prođe kroz drugu materiju koja ima indeks prelamanja jednak recipročnoj vrednosti indeksa prelamanja prve materije. Ovaj postupak ima za cilj da izjednači krajnji izlazni ugao sa početnim upadnim uglom. On može biti potreban u slučajevima kad željena svetlost mora da prođe kroz neku drugu sredinu pre nego što stigne do svog prijemnika. Da bi se svetlost doveća u prijemnik pod svojim pravim uglom, mora se potpuno otkloniti premeštanje do kojeg je došlo u drugoj sredini. Problemi slični ovom primeru postoje kod optičkih instrumenata koji se upotrebljavaju za astronomsku posmatranja. Instrumenti moraju biti smešteni u zaštićeni prostor, kao što je trup projektila. Spoljni svetlosni zrak prolazi kroz debelo staklo koje, naravno, ima indeks prelamanja drukčiji nego što je indeks prelamanja spoljne atmosfere.

Pri ovom su potrebna složena računanja, pošto se indeksi prelamanja različitih sredina menjaju s promenama temperature i gustine. Na primer, M vode je približno 1,333, ali ako se ona smrzne, onda njen M iznosi oko 1,31.

Promene atmosferskih uslova dovode do promene prelamanja svetlosti nebeskih tela; zbog toga je poželjno da se za sistem astronavigacije kao orientir izabere ona zvezda čija svetlost pada podugom što je moguće bližim normali na Zemljin vazdušni omotač.

Svetlosne zrake koji prolaze kroz uzastopne slojeve vazduha različite gustine, ili kroz providne sredine sa različitim indeksima prelamanja, svaki sloj lomi i usmerava duž novog pravca zračenja. Kad se ovaj proces dešava primetnom brzinom, on stvara efekat zvani *scintilacija*, poznatiji pod imenom svetlucanje ili treperenje. Treperenje svetlosti zvezda proizvodi se na taj način. Sličan efekat može se primetiti i kod elektromagnetskih talasa koji prolaze kroz provodnike čije su karakteristike prelamanja za svaku dužinu talasa zračenja drukčije.

Svetlost koja se odbije od površina s mnogo brušenih strana, kao što su sečeni dijamanti, teži da proizvede efekat svetlucanja ili treperenja. Elektromagnetski talasi koji se odbijaju od raznih predmeta pa stižu u prijemnik u intervalima nešto kasnije nego direktni snop teže da stvore razlike u fazi i frekvencije različitog stepena. Ovo ima za rezultat potiranje faze i interferenciju, poznatu pod imenom »feding«, »kolebanje signala«, ili »duhovi«.

Na televizijskom ekranu »duh« se pojavljuje kad signali koji se prenose stižu u prijemnik većim brojem putanja koje su nejednake dužine. To stvara dve slike ili više slike malo pomerenih u fazi i vremenu.

Radarski signali se podvrgavaju istom efektu. Do njega dolazi kad se signali odbijaju od površina koje se kreću, ili od više objekata, ili kad ih prelambaju neravnine terena ili nejednakost atmosfere. Da bi se ovaj efekat fluktuarije ili scincilacije sveo na minimum, radarski snop se tako sužava da i upadni i prelomljeni snop idu kroz usku zonu, pa se usled toga manje odbijaju od drugih predmeta nego od onih koji se nalaze neposredno duž glavne ose snopa. Kad svetlucanje stvara fiksni ili konstantni niz različitih sredina koje jedna drugu smenjuju, frekvencija svetlucanja može se iskoristiti za identifikovanje putanje, ili za određivanje izvora zračenja.

FUNKCIJE PRIZMI

Prosta optička sprava koja se može upotrebiti za kompenziranje pomeranja svetlosti ili za to da se proizvede izvesno određeno skretanje svetlosnog snopa jeste prizma, koja je ukratko opisana u prethodnom odeljku.

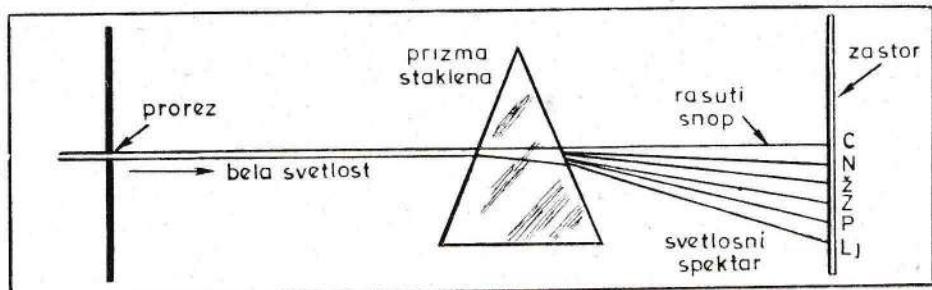
Veličina skretanja koje proizvodi trostrana prizma zavisi od ugla prizme, indeksa prelamanja materijala od kojeg je prizma izrađena i upadnog ugla svetlosti koja prolazi kroz prizmu.

Podešavanjem položaja obične trostrane prizme u odnosu na svetlosni izvor i izborom prizme pogodnog ugla može se postići da se željeno skretanje svetlosnog snopa proizvede čak do ostvarenja potpunog odbijanja svetlosti.

Izvestan deo svetlosti upija ili odbija prividna sredina; prema tome, jačina svetlosti koja izlazi je manja od upadne svetlosti čak i kad je upadni ugao 90° . Kad svetlosni zrak prođe kroz vazduh i udari o površinu prozorskog stakla podugom od 90° (upravno), oko 4% upadne svetlosti se odbije, a ostalih 96% prolazi kroz staklo. Stepen do koga se svetlost upija pri prolasku kroz provodnu sredinu zavisi od prirode materije te sredine, njenog indeksa prelamanja i upadnog ugla.

SPEKTAR

Duga koju stvara Sunčeva svetlost prolazeći kroz pukotinu u zamračenu sobu jeste vidljivi spektar boja. Ova pojava je rezultat prelamanja i rasipanja svetlosnih zrakova i služi kao primer osnovnog principa spektrografije.



Sl. 129 — Rasipanje svetlosti kroz prizmu

U stvari, bela svetlost je sastavljena od svetlosnih zrakova mnogih boja koje su pomešane. Kad takva svetlost prolazi kroz uzak otvor ili prorez u neku sredinu koja ih prelama, zraci svake boje lome se pod drugičijim uglom i obrazuje izduženu obojenu traku sastavljenu od šest glavnih boja. To su crvena, narandžasta, žuta, zelena, plava i ljubičasta. Prelamanje svetlosnih zrakova pod različitim uglovima stvara »dug« ili spektar boja. Prizma koja je pokazana na slici 129 deluje kao prelамаjuća sredina, stvarajući na taj način svetlosni spektar.

Spektar je sastavljen od stotine nijansi koje se, uzimajući grubo, grupišu u šest pomenutih glavnih boja. One se pojavljuju u nizu za sve većim skretanjem, idući od crvene ka ljubičastoj.

Boja svetlosti je određena njenom frekvencijom treperenja. Za crvenu boju ta je frekvencija najmanja, a za ljubičastu najveća. Prema tome, talasna dužina λ (lambda) najduža je za infracrvenu svetlost, a najkraća za ultraljubičastu svetlost; dalje svaka boja ima izvesne odlike i svojstva koja se mogu iskoristiti i na svetlosno osetljivim ili optičkim sistemima za vođenje projektila.

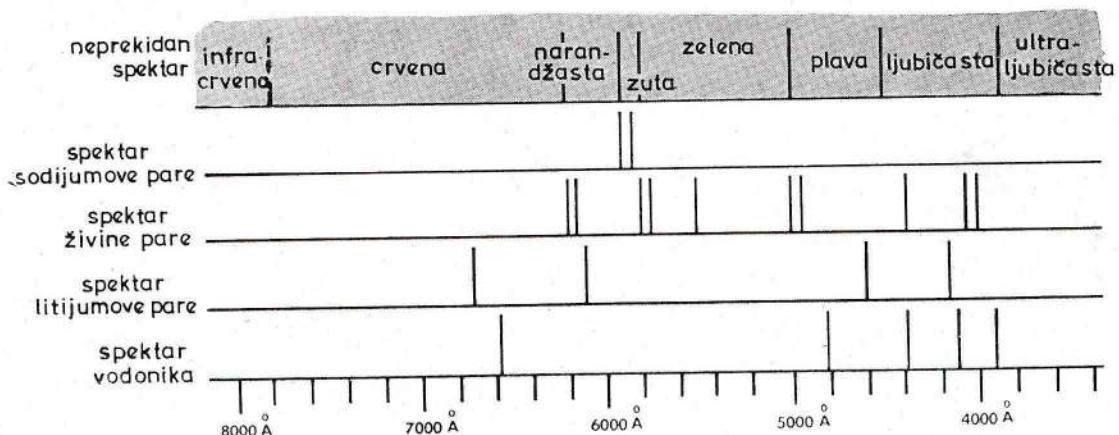
Skretanje koje proizvodi prizma veće je za komponente bele boje koje imaju manju frekvenciju nego za nijasne veće frekvencije, ali ne postoji tačno određen odnos između frekvencije i skretanja. Tako, na primer, prizme načinjene od raznog materijala različito rasipaju boje od kojih je sastavljen spektar.

Neki materijali proizvode *nенормално* rasipanje, to jest prizme načinjene od tih materijala ne rasipaju belu svetlost u pravilan redosled boja. Takve prizme skreću neke boje mnogo jače nego druge, a i upijaju izvesne delove spektra.

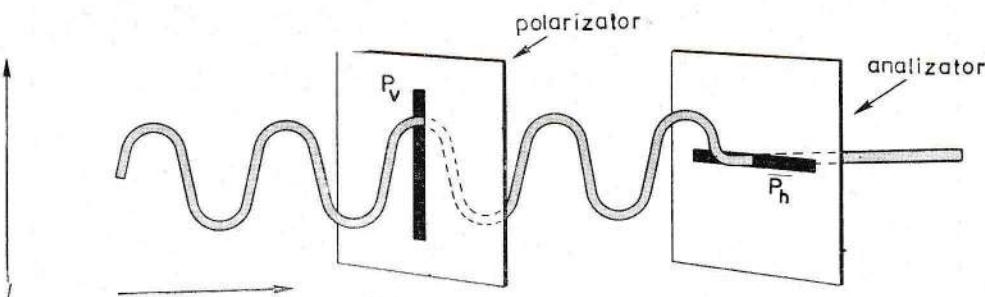
Pri proučavanju kvantitativne strane spektra potrebno je da se svaki njegov deo jasno odredi. To se postiže označavanjem svake boje brzinom treperenja svetlosnih izvora i njenom odgovarajućom talasnom dužinom. Kao i pri svim drugim oblicima talasnog kretanja, brzina svetlosti jednaka je talasnoj dužini pomnoženoj sa frekvencijom:

$$V = f\lambda$$

gde je »f« frekvencija, a » λ « talasna dužina. Kad sredina usporava svetlost, kao što to čini staklo, frekvencija ostaje nepromenjena, ali po-



Sl. 130 — Neprekidni spektri i spektri sa svetlim linijama



Sl. 131 — Analogija polarizovanja transverzalnog talasa

što se u tom slučaju brzina ipak smanjuje, to se srazmerno tome mora smanjiti i talasna dužina λ . Prema tome, λ nije konstantna veličina za dato treperenje, već zavisi od sredine.

Obično se vrednost λ za razne boje spektra daju kao talasne dužine u vazduhu ili u vakuumu. Talasne dužine za vidljivu svetlost su tako male da se za njihovo merenje obično upotrebljava specijalna jedinica, mnogo kraća od santimetra. Ova jedinica je poznata kao *angstrom*, nazvana u čast švedskog fizičara Angstrema (*Angstrom*). Angstrom (\AA) je jednak stominionitom delu santimetra (10^{-8} cm).

U nekim slučajevima niskofrekventnih radijacija kao jedinica mere može se upotrebiti mikron. Mikron je jednak vrednosti 10.000 \AA .

Spektri se često dele u tri glavne grupe: emisione, apsorpcione i sunčane.

Emisioni spektar. Spektar koji stvara usijano telo naziva se *emisionim spektrom*. Njegov izgled zavisi u prvom redu od sastava i stanja svetlećeg tela.

Belousijana čvrsta i tečna tela proizvode neprekidne spekture, koji se šire od jedne do druge boje bez prekida. Svetli gasovi i pare daju spekture koji se sastoje od svetlih linija postavljenih na određenim mestima. Svaka svetla linija je slika proreza kroz koji je zračenje primljeno.

Svaki gas emituje zrake određene talasne dužine, a svaki spektar je karakterističan za do-tičnu svetleću materiju. Na primer, sodijumova para daje dve svetle linije u žutom delu spektra, dok živila para daje nekoliko svetlih linija, od kojih su najjasnije one u zelenom i plavom pojasu. Slika 130 pokazuje svetle linije spektra nekoliko elemenata u granicama vidljivog spektra. Neprekidan spektar u vrhu slike predstavlja neprekidan niz slika osvetljenog proreza.

Broj linija u spektru sa svetlim linijama zavisi od količine energije kojom se atomi izvora pobuđuju da proizvode belo usijanje, a isto tako i od prirode izvora. Ukoliko je pobuđenost atoma materije veća, utolikoj je veći broj linija koje se pojavljuju u spektru materije.

Apsorpcioni spektar. Do apsorpcionog spektra dolazi kad svetlost pre nego što se raspe prode kroz apsorbujuću sredinu. Belousijana čvrsto telo, ili drugi izvor iz kojeg se svetlost zrači, daje neprekidan spektar; ali ako ta svetlost prolazi kroz neku apsorbujuću sredinu, onda se zraci određene talasne dužine apsorbuju. Spektar koji se u tom slučaju dobije obično je isprekidan tamnim prostorima nastalim zbog odsustva apsorbovanih zrakova. Ako je apsorbujući materijal čvrst ili tečan, ovi tamni prostori izgledaju kao široki, bezstrukturalni pojasevi. Ako je materijal gasovit, tamni prostori se sastoje od tamnih linija koje zauzimaju iste delove kao svetle linijske na odgovarajućem spektaru sa svetlim linijama.

Sunčani spektar. Spektar koji obrazuju Sunčevi zraci zove se *sunčani spektar*. Kad se gleda površno, ovaj spektar izgleda neprekidan; međutim, pažljivije ispitivanje pokazuje da je on isprekidan brojnim tamnim linijama. Bez sumnje, zračenje Sunca obuhvata sve talasne dužine vidljivog dela spektra, ali pri prolasku kroz Sunčevu »atmosferu« neke talasne dužine bivaju apsorbowane. Prema tome, spektar koji se vidi u stvari je apsorpcioni spektar Sunčeve atmosfere.

Sada možemo ukratko izložiti vrste spektra. Neprekidne spekture proizvode belousijana čvrsta i tečna tela. Spektri sa svetlim linijama potiču od belousijanih para i gasova. Apsorpcioni spektar proizvodi svetlost koja polazi od svetlosijanog čvrstog ili tečnog tela i prolazi kroz belousijanu paru ili gas. Na kraju, može se konstatovati da je Sunčani spektar u stvari apsorpcioni spektar.

POLARIZOVANJE SVETLOSTI

Kad se pojavi pitanje da li su svetlosni tali-si longitudinalni, kao zvučni talasi, ili su transverzalni, kao elastični talasi, preporučljivo je da se razmotri pojava polarizovanja svetlosti.

Ako svetlosni snop prolazi kroz materiju sa stavljenom od dve boje, kao što je turmalin, ili kroz ploču polaroida, onda je taj prolazak ograničen na određenu ravan oscilacije. Za takav snop se kaže da je *polarizovan u obliku ravni*; on će proći kroz drugi kristal turmalina ili drugu ploču polaroida samo ako su oni orijentisani tačno kao prvi kristal, odnosno prva ploča. Ako se drugi kristal ili ploča okrenu za 90° u odnosu na prvi kristal (prvu ploču), onda kroz njih ne prolazi nikakva svetlost.

Prvi kristal ili ploča zove se *polarizator*, a drugi *analizator*. Analizator je dobio ime po tome što se ugao polarizovanja može odrediti na osnovu ugla za koji se analizator mora obrnuti od položaja pri kome propušta svetlost do položaja pri kome to ne čini. Slika 131 ilustruje princip polarizovanja transverzalnog talasa. U ovoj analogiji svetlosnom snopu odgovara oscilišuće uže.

Vertikalne oscilacije užeta prolaze kroz vertikalni prorez (P_v), a prekidaju se horizontalnim prorezom (P_h). Talas predstavljen konopcem je polarizovan; to jest on osciliše samo u ravni (u ovom slučaju oscilacije su u vertikalnoj ravni). Svetlost se slično može polarizovati pomoću izvesnih materija, kao što su kristali turmalina ili »polaroid« (ime trgovачkog proizvoda koji poseduje ovo svojstvo).

Ako bi se u gornjem primeru prorez P_h obrnuo za 90° , talasi bi prošli kroz njega. P_v ograničava kretanje talasa samo u vertikalnoj ravni, pa je zato polarizator. P_h je analizator. Pošto se P_h mora obrnuti za 90° da bi se omogućilo da talasi produ, jasno je da stepen polarizovanja koji P_v proizvodi iznosi 90° . Stepen polarizovanja mogao bi se odrediti potrebnim rastojanjem obrtanja P_h od položaja prolaska svetlosti do položaja prestanka tog prolaska, i to čak i u slučaju kad P_v ne bi bio vidljiv.

I teorija i eksperimenti su pokazali da se longitudinalni talasi ne mogu polarizovati; stoga možemo zaključiti da svetlost mora imati kretanje u obliku transverzalnog talasa, ako ona uopšte ima oblik talasnog kretanja.

Svetlost se može znatno polarizovati samim odbijanjem. Sva se odbijena svetlost do izvesnog stepena polarizuje zbog njenog rasipanja prouzrokovanih prašinom i česticama pare. Rasipanje je jesnije kod svetlosti male talasne dužine. Ovu tvrdnju potkrepljuju promene boje neba. Sredinom dana nebo izgleda plavo, a pri zalasku Sunca izgleda crvenasto. Zalazak Sunca je crvenkast zato što svetlost prelazi duži put kroz Zemljinu atmosferu, pa se plava svetlost, koja ima malu talasnu dužinu, rasipa. Ovo rasipanje dovodi do toga da crvenasta boja nadvlada, pošto ona ima veću talasnu dužinu.

FLUORESCENCIJA I FOSFORESCENCIJA

Neke prirodne materije imaju osobinu da emituju svetlost kad se na to pobude nekom spoljnom silom, kao što je »bombardovanje« elektronima ili izvesnim oblicima energije zračenja. U nekim slučajevima materija emituje svetlost samo dok se bombarduju; u drugim slučajevima emitovanje može trajati izvesno vreme nakon što je spoljne izazivanje prestalo. Ove se osobine zovu *fluorescencija*, odnosno *fosforescencija*, a trajanje emisije svetlosti označava se kao *inercija* materijala. Fosforescencija se obično zove *naknadno sijanje*.

Jedna od fluorescentnih materija koja se obično upotrebljava u elektronici jeste vilemit (ortosilikat cinka — $ZnSiO_4$), kristalno jedinjenje cinka različite boje, od bele, zelenožute i zelene do nijanse crvene i braon (smeđe). Bela i zelena varijanta često se upotrebljavaju u premazima ekrana katodnih cevi koje se koriste u osciloskopima i radarskim indikatorima. Vilemit se upotrebljava u televizijskim kinесkopima u kombinaciji sa drugim materijama koje daju željeni stepen postojanosti.

Uopšte, kad je emisija izazvana nekom formom zračenja, onda luminiscentna materija emituje svetlost veće talasne dužine nego što je talasna dužina upadnog zračenja. Na ovu pojavu se nailazi kod fluorescentne lampe u kojoj se nevidljivim ultravioletnim zracima izazivaju da svetle neka fosforna jedinjenja. Jedinjenja tada emituju svetlost različitih boja. Fluorescentna jedinjenja koja se upotrebljavaju u lampama koje daju »nežno belu« ili »dnevnu« svetlost su kombinacija silikata cinka i berilijuma i magnezijumovog tungstita.

Infracrveni zraci odbijeni od predmeta na fotografsku ploču koja je osjetljiva na infracrvenu svetlost mogu se upotrebljavati za posmatranje u mraku. Za ovu svrhu u toku II svetskog rata bila je konstruisana sprava zvana »snuperskop«.

Snuperskop se uglavnom sastoji od izvora infracrvene svetlosti i cevi za stvaranje slike koja ima katodu osjetljivu na svetlost. Jedna infracrvena lampa bacaa svetlosni snop iz kojeg je odstranjena sva vidljiva svetlost. Odbijeni zraci snopa zaustavljaju se na čeliji od cezijuma koja je veoma osjetljiva na infracrvenu svetlost, a obrazuje katodu cevi za stvaranje slike. Odbijeni zraci koji padnu na čeliju prouzrokuju da ona emituje fotoelektrone koji se zatim fokusiraju na fosforecentni ekran da bi obrazovali vidljivu sliku, kao u katodnom osciloskopu.

Kasnije ćemo videti da znanje o emisionom spektru bilo koje zračeće površine dobro dolazi pri projektovanju sistema za samonavođenje

projektila na cilj koji raspolaže takvim karakteristikama zračenja. Takvo znanje dobro dolazi i pri projektovanju sistema za navigaciju koji se za orientaciju koristi svetlošću nekih neprekasnih nebeskih tela.

Očigledno, takvi sistemi moraju biti veoma osetljivi i sposobni za odabiranje, zbog čega zahtevaju upotrebu optičkih delova najveće preciznosti. U poboljšanju osnovnih optičkih instrumenata i u njihovom prilagođavanju za nove potrebe učinjen je značajan napredak; isti je slučaj i sa razvojem elektronskih sistema

koji upotrebljavaju osnovne principe optike. Ovaj napredak doveo je do stvaranja sistema koji su vanredno osetljivi i odabirljivi kad je u pitanju toplota, svetlost i drugi oblici energije zračenja.

Mnogi od sadašnjih sistema za vođenje i navigaciju sastavljeni su od tih poboljšanih tipova. Nema sumnje da će dalja istraživanja i razvoj dovesti do revolucionarnih poboljšanja u pogledu njihove tačnosti i pouzdanosti, a tako isto i u pogledu njihovog prilagođavanja za upotrebu u industriji i trgovini.

PRIMENA OPTIČKIH I ELEKTRONSKIH PRINCIPIA

Ovde će se ukratko izložiti izvesne stvari o nekim osnovnim optičkim i elektronskim elementima kako bi se mogli razumeti sistemi za vođenje i navigaciju projektila. Razmatrajući te osnovne elemente može se steći opšta slika o tome kako se svetlosni talasi koriste zajedno sa elektromagnetskim talasima u elektronskoj opremi. Dalje, može se naučiti nešto o nekim osobinama koje su zajedničke obema vrstama talasa. Najpre će se razmotriti sprave koje se koriste energijom zračenja (svetlošću).

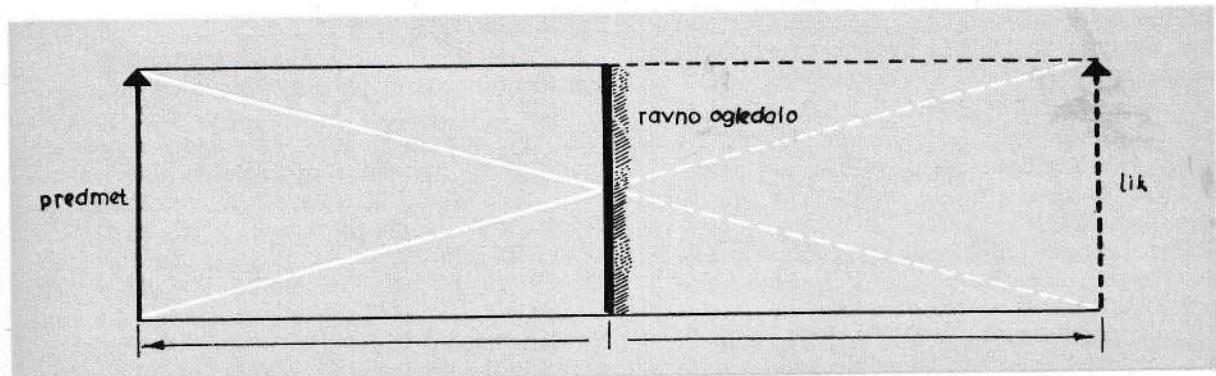
PROSTE OPTIČKE SPRAVE

Za iskorišćenje raznih fenomena energije zračenja upotrebljavaju se proste optičke sprave, kao što su ogledala, prizme i sočiva, i to same ili, da bi se zadovoljili složeni zahtevi, u kombinacijama.

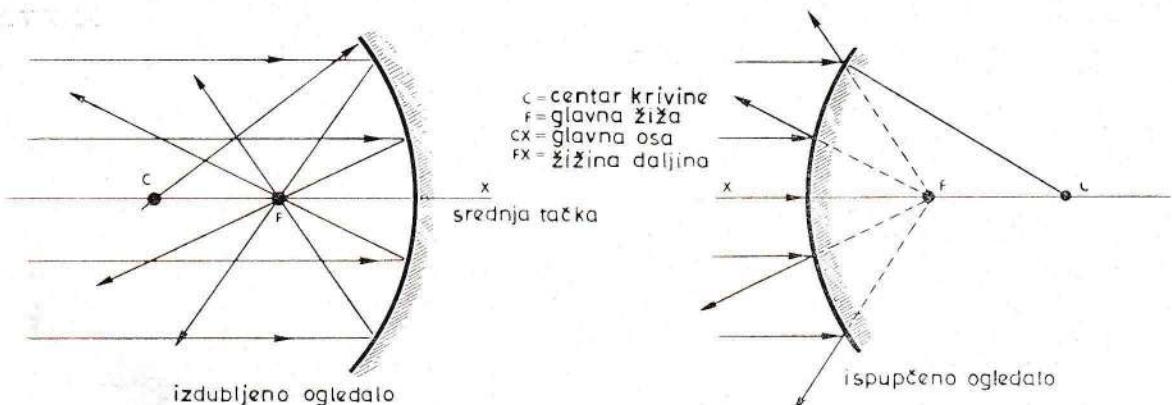
FUNKCIJE OGLEDALA

Ogledalo je politirana ili glatka površina koja obrazuje likove predmeta pomoću odbijene svetlosti. Kad se predmet postavi ispred ravnog ogledala, obrazuje se simetričan uspravan lik. Lik izgleda da je tačno toliko iza površine ogledala koliko se predmet nalazi ispred nje. Na ovu prostu pojavu se nailazi kad god se prilazi ogledalu. Tada se zapaža kao da slika posmatrača ide u susret iz tačke iza ogledala koja je isto toliko udaljena od površine ogledala koliko i posmatrač. Ova pojava je u saglasnosti sa zakonima odbijanja svetlosti i jedna je od važnih u optici.

Slika 132 pokazuje ravno ogledalo sa likom koji je uspravan i vertikalni i izgleda kao da je toliko iza ogledala koliko je predmet ispred njega.



Sl. 132 — Udaljenost predmeta od ogledala jednaka je udaljenosti lika



SL. 133 — Odbijanje upadne svetlosti pomoću sfernog ogledala

Kriviljenjem reflektujućih površina može se postići da one daju razne slučajevе položaja i veličine lika. Ovo stoga što se time skreće svetlosni snop i čine da se on, kad se reflektuje, usredsredi u većoj ili manjoj meri nego kad svetlost padne na ogledalo.

Sferna ogledala se dele na izdubljena (konkavna) i ispučena (konveksna). Izdubljeno ogledalo ima svoju reflektujuću površinu na unutrašnjoj strani kalote, dok ispučeno ogledalo ima svoju reflektujuću površinu na spoljnoj strani kalote.

Centar sferne površine zove se centar krivine ogledala. Linija koja vezuje srednju tačku površine ogledala i centar krivine zove se glavna osa ogledala. Slika 133 pokazuje dva tipa sfernog ogledala i kako svaki od njih odbija upadnu svetlost.

Tačka »F« je glavna žiža ogledala. Rastojanje između glavne žiže i ogledala je žižna daljina. Glavna žiža sfernog ogledala je smeštena na glavnoj osi ogledala, i to na sredini između centra krivine i površine ogledala.

Izdubljeno ogledalo je sabirni reflektor, jer ono u stvari sabira ili skuplja svetlosne zrake. Ispučeno ogledalo je rasipno ogledalo, jer ono dovodi do toga da izgleda kao da se svetlosni zraci razilaze.

Odnos između dimenzija ogledala i poluprečnika krivine zove se apertura ogledala. Većina optičkih ogledala ima malu aperturu i proizvodi samo malo naginjanje upadnih zrakova prema glavnoj osi.

Odnos između veličine lika i veličine predmeta zove se uvećanje ogledala. Ispučeno ogledalo uvek stvara smanjen ali uspravan lik. Izdubljeno ogledalo može biti tako načinjeno da stvara obrnute likove koji izgledaju kao da stoje u prostoru, ispred ogledala, ili uspravne likove koji izgledaju kao da se nalaze iza ogledala.

Obrnuti likovi zovu se *realni likovi*, jer izgledaju kao da stvarno postoje tamo gde se svetlosni zraci sekut, a i zato što im se može odrediti mesto na zaklonu. Uspravni likovi zovu se *virtuelni likovi*; oni se ne mogu projektovati na zaklon.

Ogledala su delovi optičkih sistema koji se upotrebljavaju u navigacijskim i geodetskim instrumentima. Često se optički sistem upotrebljava zajedno sa elektronskim sistemom koji pretvara optičke u električne podatke. Električni podaci mogu se potom prenositi na velike daljine. Televizija je primer takvog kombinovanog optičkog i elektronskog sistema.

UPOTREBA PRIZMI

Prizme, o kojima je bilo reči u odeljku o rasipanju, odbijanju i prelamanju svetlosti, upotrebljavaju se u dvogledima, spektroskopima, refraktometrima i mnogim drugim optičkim spravama koje iskorišćavaju pojavu rasipanja i prelamanja svetlosti.

Karakteristike svetlosti i hemijski sastav svetlosnih izvora mogu se odrediti metodama koji obuhvataju upotrebu prizmi.

U sistemima za astronavigaciju svetlost zvezde izabrane za orientaciju može se tako propustiti kroz prizmu, da se preovlađujuća ili bilo koja druga boja koja postoji u rasutom snopu, može iskoristiti za to da se aktivira pogodna fotokatoda ili na svetlost osjetljiva čelija. Fotokatoda ili čelija stvara i održava toliki napon ili jačinu struje koja je srazmerna frekvenciji (boji) i jačini svetlosti koja pada na nju.

Iz ovoga se može zamisliti kako se tako konstantan napon ili struja mogu upotrebiti za upravljanje navigacijskim sistemom duž utvrđene putanje koja je orijentisana u odnosu na jedan svetlosni izvor ili više takvih izvora, kao

što su zvezde. Mnoge od zvezda nekretnica emituju svetlost koja se karakteriše nekom specifičnom bojom, kao što je slučaj sa Arkturusom, koji je plav, i sa Aldebaranom, koji je crven. Spika je spektroskopski dvostruka, to jest Spikina bela boja je mešavina dve preovlađujuće boje.

Kad se svetlosni spektar jednom ustanovi i uvede u pregled, onda se pomoću njega može identifikovati zvezda. Spektroskopska oprema obuhvata prizme za rasipanje svetlosti koja se odbija od planete ili koju emitiše zvezda.

SASTAV I UPOTREBA SOČIVA

Pored ogledala i prizmi, u optičkim i elektronskooptičkim sistemima obično se, u ovom ili onom obliku, nalaze i sočiva.

U suštini, optičko sočivo je komad stakla ili drugog providnog materijala koji ima dve pravilne površine postavljene jedna nasuprot druge. Obe te površine mogu biti krive, ili je jedna kriva a druga ravna.

Sočiva se upotrebljavaju, pojedinačno ili u kombinaciji sa drugim sočivima, prizmama ili ogledalima, radi izvršavanja određenih zadataka. Glavna funkcija sočiva je obrazovanje lika menjanjem pravca svetlosnih zrakova. Optički instrumenti, kao što su naočari, kamere, mikroskopi i teleskopi, u osnovi su sistemi sočiva.

Krine površine sočiva su obično sferne, mada se u retkim slučajevima može naići na cilindrična sočiva.

Sferna sočiva mogu se podeliti uglavnom u šest grupa:

a. Plankonkavna: jedna ravna površina i jedna suprotna, izdubljena kriva površina.

b. Dvogubo izdubljena (bikonkavna): dve jedna drugoj suprotne izdubljene krive površine.

c. Plankonveksna: jedna ravna površina i jedna suprotna, ispučena kriva površina.

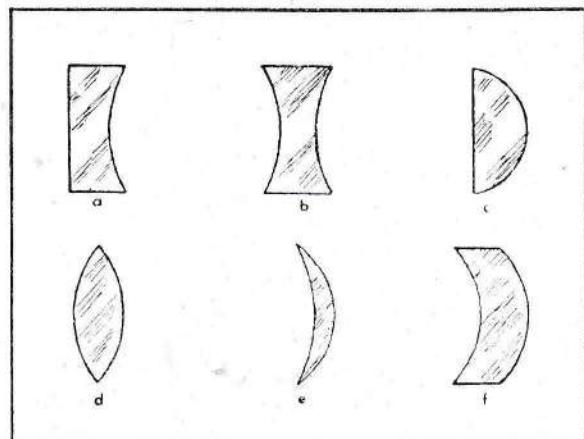
d. Dvogubo ispučena (bikonveksna): dve jedna drugoj suprotne ispučene površine.

e. Sabirna konkavkonveksna (sabirni meniskus).

f. Rasipna konkavkonveksna (rasipni meniskus).

U svim ovim sfernim sočivima linija koja vezuje središta dvekrivina je simetrala sočiva i naziva se optičkom osom sočiva.

Sočivo čija je žiža za paralelne zrake stvarna zove se sabirno sočivo, kao u slučaju ogledala. Sočivo koje za takve zrake ima virtualnu žižu zove se rasipno sočivo.

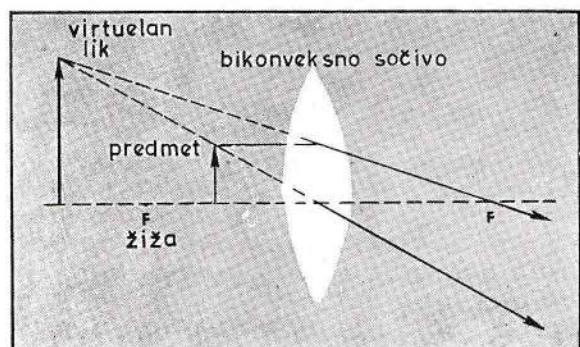


Sl. 134 — Šest tipova sfernih sočiva

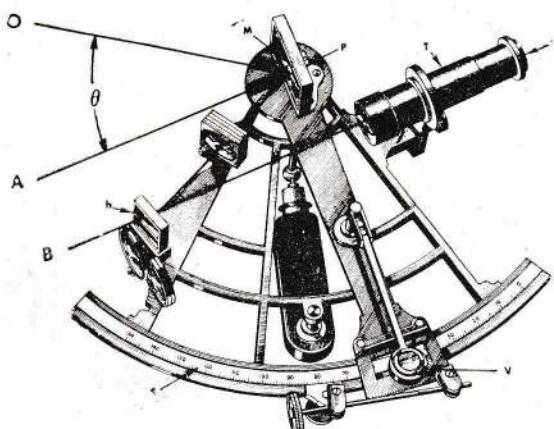
Mnogi od principa sočiva koji se odnose na svetlost važe takođe i za druge oblike zračenja, kao što su elektromagnetski talasi, katodni zraci itd.

Prva značajna naučna primena principa optike bila je u astronomiji. Italijanski fizičar Galileo Galilej (*Galileo Galilei*), s početka 17 veka, smatra se uopšte za praoča optičkih instrumenata; ali je verovatno da su se naočari upotrebljavale i pre Galilejevog vremena, a skoro je sigurno da su neka svojstva prostih sočiva i prizmi bila poznata već pre mnogo vekova.

Prosti mikroskop (uvećavajuće staklo — lupa). Uvećavajuće staklo ili lupa obično se sastoji od prostog bikonveksnog sočiva koje tako skuplja svetlosne zrake da se na mrežnjači oka stvara veći lik nego što bi predmet stvorio bez pomoći sočiva. Slika 135 predstavlja bikonveksno sočivo koje služi kao lupa ili uvećavajuće staklo. Slika pokazuje kako sočivo stvara virtualan lik kad se predmet stavi između žiže i sočiva. Lik se pojavljuje na istoj strani sočiva na kojoj je predmet.



Sl. 135 — Lupa ili uvećavajuće staklo



Sl. 136 — Navigatorski sekstant

Kad se sočivo stavi na odstojanje od predmeta koje je manje od žižne daljine sočiva, dobiteni lik je virtualan (uspravan), a nalazi se na istoj strani na kojoj je predmet.

Ako se sočivo stavi daleko od predmeta, lik je realan (obrnut), a pojavljuje se ispred sočiva, na strani koja je suprotna onoj na kojoj je predmet.

Kod optičkih sistema s više sočiva lik koji stvara jedno sočivo može biti predmet za drugo sočivo. To je princip na kojem se zasnivaju mikroskopi i durbini.

Sekstanti. Sekstanti, koji se u navigaciji upotrebljavaju za merenje ugla između Sunca i horizonta daju mogućnost osmatraču, da odredi geografsku širinu svog položaja.

Sekstant predstavljen na slici 136 je teleskopski instrument koji osmatrač drži u ruci dok gleda kroz durbin. Za vreme viziranja osmatrač podešava sekstant dotle dok se lik Sunca i lik horizonta ne poklope u polju vida.

Sekstant koristi dva ogledala, od kojih se jedno zove *indeksno staklo* (M), a drugo *horizontsko staklo* (h). Ova ogledala su postavljena upravno na ravan sekstanta, koju čini okvir sekstanta za koju su pričvršćeni još durbin i skala. Horizontsko staklo je nepomično i ima jednu polovinu svoje površine neposrebrenu, tako da osmatrač, gledajući kroz okular (E) durbina (T), može videti horizont bez odbijanja svetlosti. Indeksno ogledalo (M) je postavljeno na pokretnoj poluzi koja se obrće u tački P i ima nonius (V) koji omogućava da se položaj indeksnog stakla tačno pročita na skali »S«.

Ako se pokretna poluga postavi tako da je ogledalo »M« paralelno sa ogledalom »h«, osmatrač vidi horizont preko »AMhE«. Ovaj se lik poklapa s likom koji se vidi ako se gleda di-

rektno duž pravca »B«. Za ovaj položaj ogledala »M« nonius »V« pokazuje vrednost nula.

Kad se vizira na Sunce koje se nalazi pod uglom Θ iznad horizonta, poluga na koju je postavljeno ogledalo »M« mora se okrenuti za ugao $\Theta/2$ da bi se zraci koji dolaze do Sunca pravcem »OM« najpre odbili u pravcu »Mh«, a zatim, pomoću posrebrene polovine horizontalnog stakla (h), u durbin. Potom se dovedu u položaj da se međusobno poklope lik horizonta i lik Sunca, posle čega se na skali »S« može pročitati visina Sunca.

Pošto se poluga s nonijusom okreće samo za polovinu ugla između horizonta i Sunca, skala »S« je tako obeležena da čitanja na njoj daju celu vrednost tog ugla, to jest polovine stepena na skali obeležene su kao celi stepeni. Zbog toga cela skala obeležena od 0° do 140° ima, u stvari, dužinu luka od 70° . Ovakvo rešenje omogućava da se na skali odmah pročita ugao Θ .

Instrumenti kao što su astronomski teleskopi, niveliri, kipregeli i teodoliti u suštini su durbini montirani na odgovarajući ram, tako da se mogu okretati u horizontalnoj i vertikalnoj ravni. Vertikalni i horizontalni uglovi čitaju se na tačno podeljenim skalama čiji se tačan vertikalni i horizontalni položaj određuju pomoću libela, sunčanih ugaonih pokazivača, viskova, magnetskih kompasa ili drugih sprava upotrebljenih pojedinačno ili u kombinaciji.

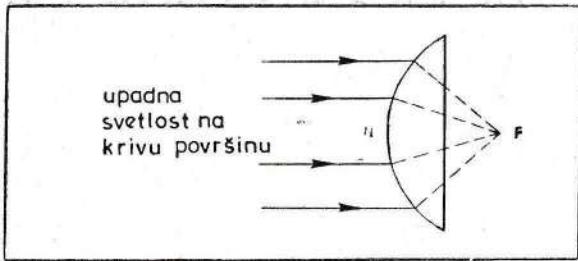
Tačnost takvih instrumenata zavisi od kvaliteta sočiva i drugih elemenata, a isto tako i od preciznosti konstrukcije i podele skala.

ABERACIJA ZRAKOVA KOJI PROLAZE KROZ SOČIVA

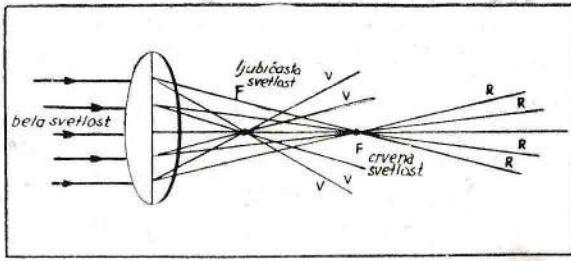
Staklo od kojeg se prave sočiva mora biti oslobođeno nečistoće i imati homogenu hemijsku strukturu, a poluprečnici sfernih površina moraju biti pravilno odabrani. Ovo doprinosi da se sferna aberacija (odstupanja zrakova od žiže) svede na najmanju moguću meru. Sferna aberacija nastaje kad se svetlosni zraci平行 sa glavnom osom sočiva ne skupe svi u zajedničku žiju, nego se umesto toga sekut u raznim tačkama glavne ose. Ovo presecanje stvara nejasan lik.

Kao što je prikazano na slici 137, plankonveksno sočivo kad se upotrebni tako da svetlost pada na njegovu krivu površinu stvara malu sfernou aberaciju.

Hromatična aberacija je drugi problem na koji se nailazi pri upotrebi sočiva. Hromatična aberacija nastaje kad se različite boje upadne svetlosti skupe u posebnim tačkama duž glavne ose sočiva. Ovo se događa zbog toga što su in-



Sl. 137 — Plakonveksno sočivo s malom sfernom aberacijom



Sl. 138 — Bikonveksno sočivo koje pokazuje hromatičnu aberaciju

deksi prelamanja boja različiti. Kao što je prikazano prilikom opisivanja spektra svetlosti, ljubičasta boja ima veći indeks prelamanja nego crvena boja; prema tome, žižna duljina sočiva manja je za ljubičastu nego za crvenu boju. Zbog toga se ljubičasti zraci sabiraju u tački koja je bliža površini sočiva nego što je tačka u kojoj se sabiraju crveni zraci. Ova pojava je ilustrovana na slici 138.

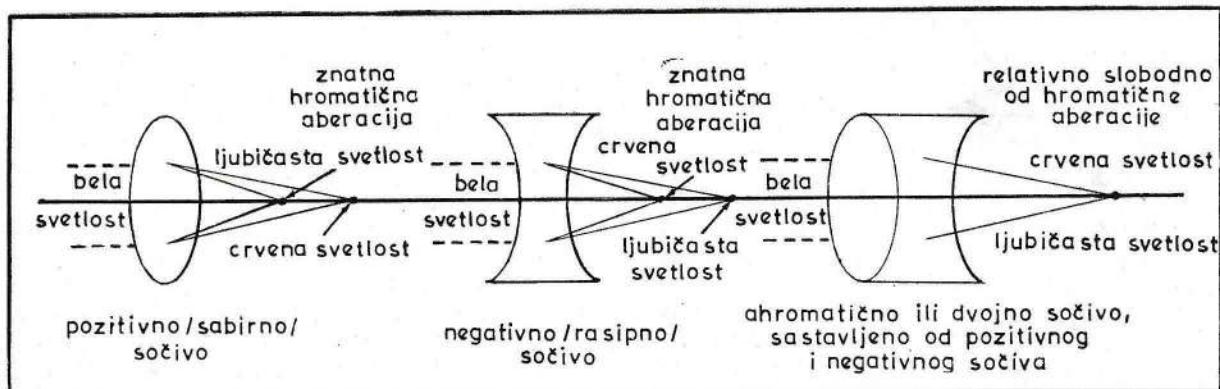
Znači, pri prolasku kroz sočivo bela svetlost teži da se raspe u sastavne boje, one, opet, teže da se skupe u raznim tačkama duž glavne ose sočiva. Ova pojava stvara hromatičnu (obojenu) aberaciju.

Da bi se otklonio ovaj efekat, mogu se tako kombinovati dva ili više sočiva da se zraci koje raseje jedno sočivo ponište njihovim sabiranjem pomoću drugog sočiva. Tako sastavljeno sočivo zove se *ahromatično* ili *dvojno sočivo*. Ono se obično sastoji od dva sočiva suprotnih rasipnih karakteristika koja su postavljena tako da se dodiruju. Slika 139 pokazuje jedno bikonveksno sočivo (pozitivno), jedno bikonkavno rasipno sočivo (negativno) i jedno *ahromatično sočivo*, sastavljeno od ta dva sočiva, koje je uglavnom oslobođeno hromatične aberacije.

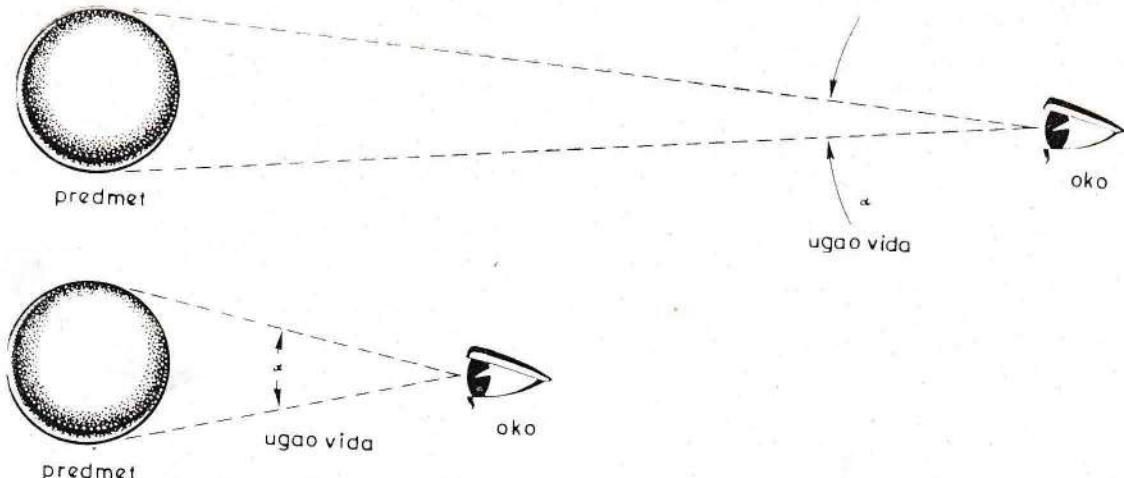
Uzrok nejasnoće lika koju stvara sferno sočivo može da leži i u *astigmatizmu*. Ova pojava nastaje kad svetlosni zraci koso prolaze kroz sočivo i ne skupljaju se u zajedničkoj tački. Ovaj nedostatak može se otkloniti upotrebom dva sočiva koja su na određeni način odvojena jedno od drugog.

Cinjenica da se u navigaciji projektila velikog dometa zahteva visok stepen tačnosti govori jasno da svaka optička sprava koja se upotrebljava u raketnoj navigaciji mora biti veoma precizna i neosetljiva na neželjene spoljne uticaje.

Sistemi za astronavigaciju koji se koriste određenim zvezdama kao orientacionim tačkama moraju da budu »osetljivi« samo za izabranu zvezdu, a ne smeju da reaguju na svetlosne zrake drukčije jačine ili boje koji bi mogli doći u polje vida teleskopa. To znači da sve prizme upotrebljene u sistemu moraju da budu tačno orijentisane u odnosu na upadnu svetlost, koja do njih stiže kroz teleskop »za pronađenje zvezde«, tako da se željeni deo prelomljenog spektra upućuje ka fotokatodi ili fotoćeliji radi održavanja standardnog orientacionog napona ili struje za sistem.



Sl. 139 — Hromatična aberacija prouzrokovana raznim tipovima sočiva



Sl. 140 — Odnos između udaljenosti predmeta i vidnog ugla

Sva tako upotrebljena sočiva moraju biti oslobođena hromatične aberacije ili brižljivo kompenzirana pomoću drugih sočiva ili filtera boja. Ona takođe moraju biti oslobođena sferne aberacije i astigmatizma, pošto i svako malo skretanje upadnog snopa unutar optičkog sistema može da prouzrokuje u navigacijskom sistemu pojavu velike greške u poziciji».

Svojstvo pravolinijskog rasprostiranja svetlosti. Većina astronomskih sistema i sistema za nebesku navigaciju koristi se svojstvom pravolinijskog rasprostiranja svetlosti. Daljine i uglovi računaju se na osnovu merenja na orientacione zvezde po pravim linijama; prema tome, svaki činilac koji bi skrenuo ili savio svetlosne zrake doveo bi do toga da se pojave greške u računanjima. Teleskopi za »pronalaženje zvezda« obično se montiraju tako da se zvezda, kad se vidi duž glavne ose sočiva u teleskopu, nalazi u ravni koja je upravna na Zemljin atmosferski omotač. Ovaj položaj održava se pomoću stabilizovane platforme (ona služi kao postolje optičkim delovima za astronavigaciju) i tačnih planparalelnih staklenih okana na prozorima u telu projektila. Kroz te prozore svetlost nebeskog tela mora da prođe pre nego što dospe do teleskopa.

Za demonstriranje pravolinijskog rasprostiranja svetlosti može da posluži kamera s otvorom u obliku tačke. Slika predmeta na filmu stvara se kao rezultat fotohemskiog delovanja svetlosnih zrakova koji dolaze iz svake tačke predmeta. Ovi zraci prolaze u pravim linijama kroz otvor u vidu tačke i izazivaju hemijske promene na premazu (emulziji) filma ili ploče, pošto je premaz osetljiv na svetlost. Hemijske promene na premazu su srazmerne količini sve-

tlosti koja do njega dopre sa odgovarajućih tačaka predmeta.

Dimenzije kamere i veličina otvora na njoj ograničavaju veličinu lika. Povećavanjem otvora povećava se sjajnost slike i omogućava svetlosnim zracima da se rasipaju od svake tačke predmeta i da se međusobno poklapaju na filmu, tako da slika postaje zamrljana i nejasna.

Pravolinijske karakteristike svetlosti i principi rada kamere s otvorom u obliku tačke ilustrovani su na slici 141.

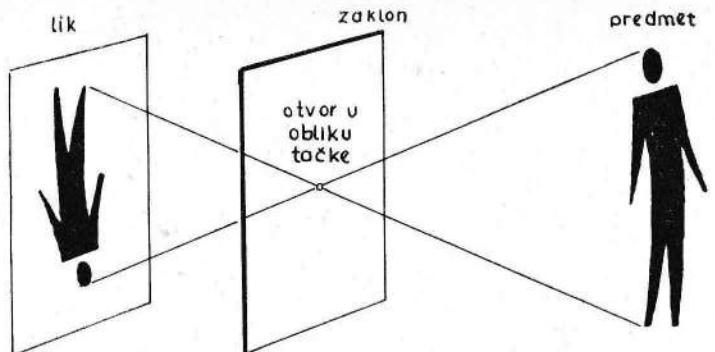
Na toj slici prikazano je kako povećavanje otvora pomenute kamere dovodi do poklapanja svetlosnih zrakova, koji dolaze s pojedinih tačaka predmeta, usled toga što se rasipaju.

Stavljanjem sočiva u proširen otvor kamere može se dobiti veća sjajnost slike, a da se pri tom slika ne raspline i ne izgubi jasnoću. Ovo se postiže podešavanjem sočiva dотle dok se divergirajući zrazi sa svih tačaka predmeta ponovo ne prikupe u odgovarajućim tačkama na filmu ili ploči u kameri. Donja skica na slici 141 pokazuje kako je to učinjeno.

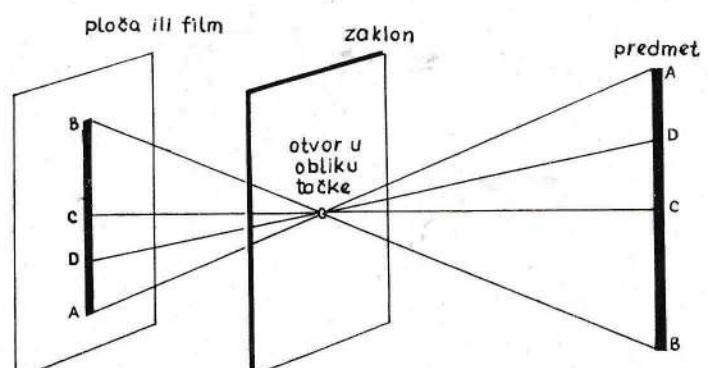
Fotografske kamere obično imaju sredstva za fokusiranje (menjanje rastojanja između sočiva i filma) i podešavanje aparature sočiva radi kontrolisanja količine svetlosti i vremena potrebnog za ekspoziciju. Ova podešavanja omogućavaju da se kamera uspešno upotrebí u veoma različitim uslovima osvetljenosti, udaljenosti i brzine predmeta.

Da bi se kamera sposobila za upotrebu u naročitim prilikama i prilagodila posebnim zahtevima (fotografisanje predmeta koji se kreću velikom brzinom ili su veoma udaljeni, obuhvatanje velikog vidnog polja, fotografisanje pod vodom, iz vazduha, sinhronizovanje neke akcije

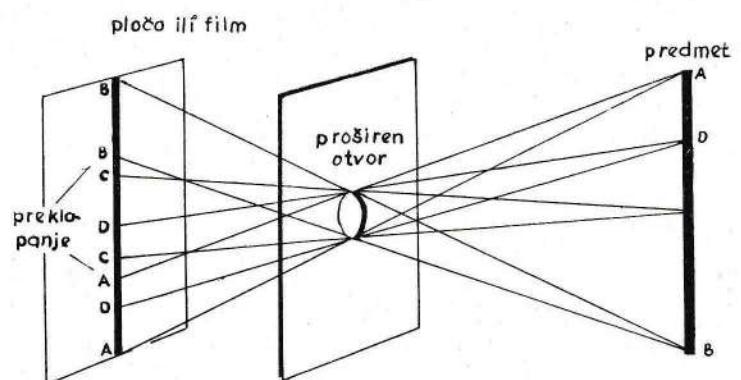
Demonstriranje pravolinijskog raspršivanja svetlosti pomoću kamere s otvorom u obliku tačke



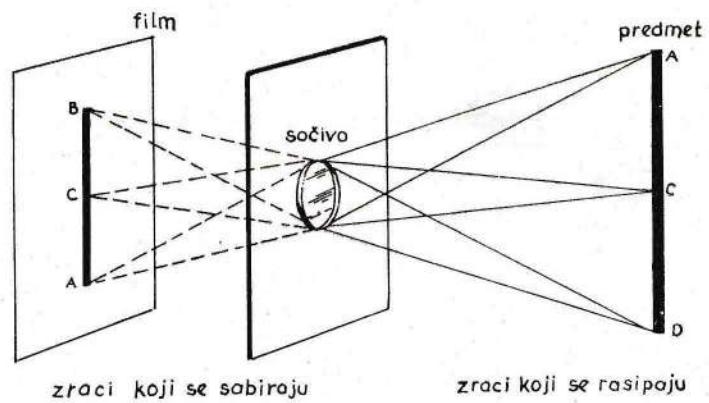
Kamera s malim otvorom koji ne dopušta preklapanje zrakova



Kamera s proširenim otvorom koji ima za rezultat preklapanje zrakova



Sočivo u otvoru kamere ponovo sabira zrake na filmu



Sl. 141 — Uticaj veličine otvora kamere

ili operacije s drugim događajima, ili čuvanje izvesnih podataka) mogu se upotrebiti specijalno konstruisana sočiva, zatvarači, svetlosni filtri i sinhronizujući pribori.

Premaz (emulzija) filma ili ploče osetljiva na svetlost mora, takođe, imati svojstva koja su neophodna za fotografisanje pod naročitim uslovima. Prilikom fotografisanja predmeta koji se brzo kreću, fotohemski dejstvo emulzije mora biti brzo, pošto se i zatvarač kreće veoma brzo da bi se sprečilo zamagljivanje lika.

Već je poznato da se u durbinima prime-uju ogledala, prizme i sočiva. Sada će se videti kako ovi optički elementi funkcionišu u durbinima.

DURBINI

Za ove svrhe durbin se može definisati kao optički instrument koji pomoću kombinacije sočiva, ili kombinacije sočiva i ogledala (ili prizmi), uvećava prividnu veličinu udaljenog predmeta.

Predmet veoma udaljen od oka videće se pod malim uglom vida, ako se posmatra na manjoj daljini, videće se pod većim uglom vida. Ova pojava je ilustrovana na slici 140.

Stepen uvećanja koji se postiže optičkim instrumentom može se definisati kao odnos veličine lika koji se obrazuje na mrežnjači oka kad se predmet posmatra instrumentom i veličine lika koji se obrazuje na mrežnjači oka kad se predmet posmatra bez instrumenta.

Relativna veličina likova može se izraziti veličinom uglova koje likovi na mrežnjači oka obrazuju u izvesnoj tački na optičkoj osi oka i na kristalnoj liniji sočiva u dubini oka.

Veličina lika na mrežnjači zavisi od udaljenosti između predmeta i oka; samo, postoji granica za veličinu lika koji se može obrazovati na mrežnjači. Upotreboom sabirnog sočiva ili lupe

povećava se veličina lika na mrežnjači, jer se tada povećava ugao vida kao rezultat toga što se obrazuje realan lik koji je bliži oku nego predmet.

Za veliko uvećanje moraju se upotrebiti okulari male žižne daljine a objektivi velike žižne daljine. Okulari male žižne daljine proširuju ugao vida i na taj način uvećavaju dimenzije lika.

Pri posmatranju dalekih predmeta, kao što su zvezde i planete, astronomski durbini skupljaju i usredsređuju širok snop svetlosti i time čine predmet vidljivim ili jasnijim. Postoje mnoge varijante astronomskih durbina, ali se obično svi dele na refraktore i teleskope.

Refraktori. Refraktor je vrsta durbina sa dva sočiva, ili dva sistema sočiva. Jedan sistem obuhvata objektiv koji služi za skupljanje svetlosnog snopa i za obrazovanje lika. Lik se potom uvećava drugim sočivom poznatim kao okular.

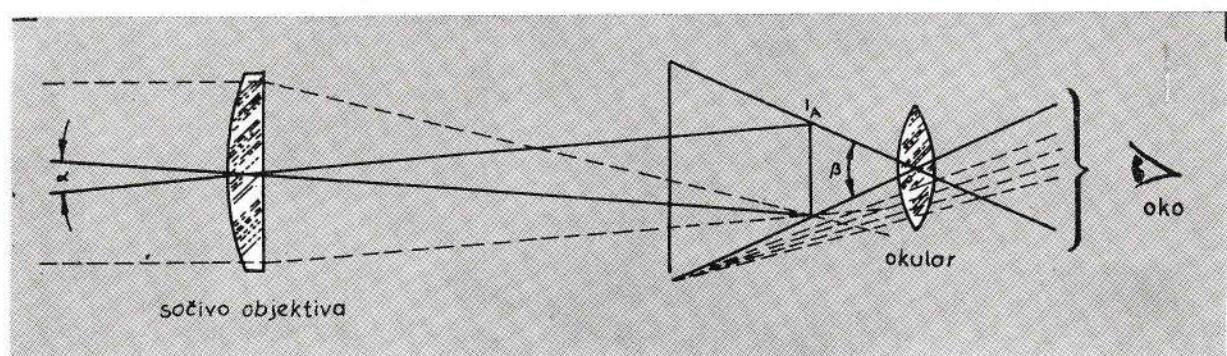
Objektiv ovog durbina ima što je moguće veću žižnu daljinu (ona je ograničena dužinom cevi durbina) i obrazuje realan lik predmeta. Okular ima malu žižnu daljinu (25 cm i manje) i obrazuje vizuelan lik lika koji je obrazovao objektiv. Kao što je gore pomenuto, okular uvećava lik povećanjem ugla vida.

Optičko ustrojstvo refraktora prikazano je na slici 142.

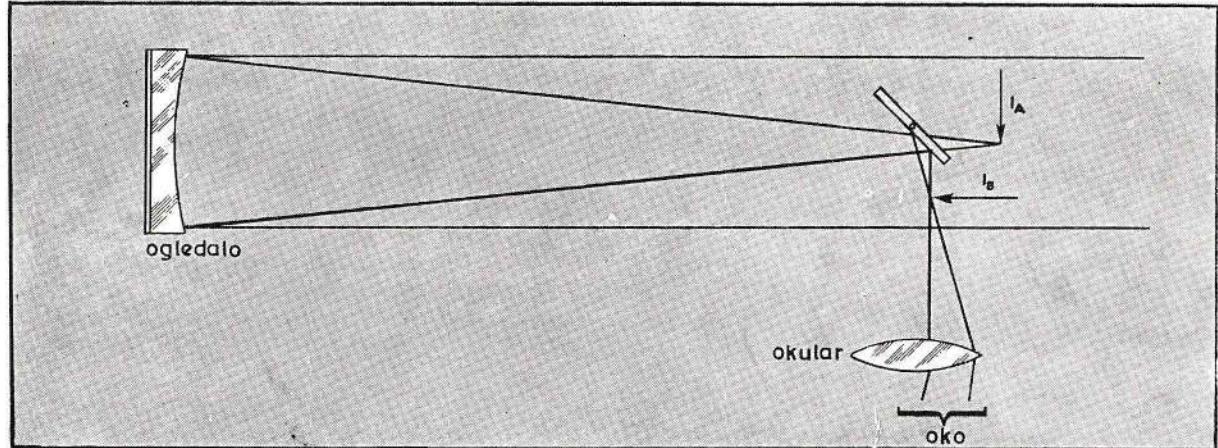
Isprekidane linije predstavljaju zrake od gornjeg kraja udaljenog predmeta. Zraci se sastaju na donjem kraju (tačka luka) lika I_A pomoću objektiva.

Ovi zraci nastavljaju da idu dalje i skreću, zahvaljujući okularu, tako da izgleda kao da dolaze od gornjeg kraja obrnutog lika I_B .

Pune linije, koje prolaze kroz centre sočiva, predstavljaju zrake od krajnjih tačaka predmeta i lika.



Sl. 142 — Astronomski refraktor



Sl. 143 — Astronomski teleskop

Bez durbina predmet bi obrazovao lik na mrežnjači oka s uglom vida α , dok pomoću durbina obrazuje veći ugao vida β .

Uvećanje ovog durbina može se predstaviti odnosom ova dva ugla vida:

$$M = \frac{\beta}{\alpha}$$

Pošto se lik I_A nalazi u glavnoj žiji okulara koji ima žižnu daljinu »F«, očevidno je da je:

$$\alpha = \frac{I_A}{F}, \text{ a } \beta = \frac{I_B}{F}$$

Prema tome, uvećanje durbina (M) jednako je

$$\frac{F}{T}$$

Sočivo objektiva refraktora je brižljivo pojavljeno ahromatično sočivo, a okular se obično sastoji od složenog sočiva.

Teleskopi. Druga vrsta astronomskog durbina zove se teleskop. U njemu je za skupljanje svetlosnog snopa i obrazovanje lika upotrebљeno izdubljeno ogledalo. I teleskop ima okular za uvećanje lika.

Teleskopi se mogu izrađivati s kraćom ukupnom dužinom a širim poljem vida nego što ih imaju reflektori istog uvećanja. Zbog toga većina astronomskih durbina velike moći pripada tipu teleskopa.

Slika 143 prikazuje teleskop koji je konstruisao Njutn. Kod tog teleskopa malo ravno ogledalo (ili prizma koja potpuno reflektuje) na optičkoj osi teleskopa skreće realni lik obrazovan pomoću izdubljenog ogledala iz položaja I_A u položaj I_B . Iz položaja I_B lik se uvećava okularom, koji je postavljen pod pravim uglom u odnosu na ravan izdubljenog sabirnog ogledala.

Rad reflektora i teleskopa zasnovan je na istim osnovnim optičkim principima.

Ako se durbini upotrebljava za fotografisanje, skine se okular pa se u tački gde se pomoću okulara obrazuje lik namesti osetljiva ploča ili film. Optička shema u ovom slučaju ista je kao kod kamere velike žižne daljine.

U navigaciji projektila primenjuju se sistemi koji se za praćenje zvezda služe durbinima reflektorskog tipa, s veoma tačnim sočivima velikog uvećanja i relativno uskim poljem vida.

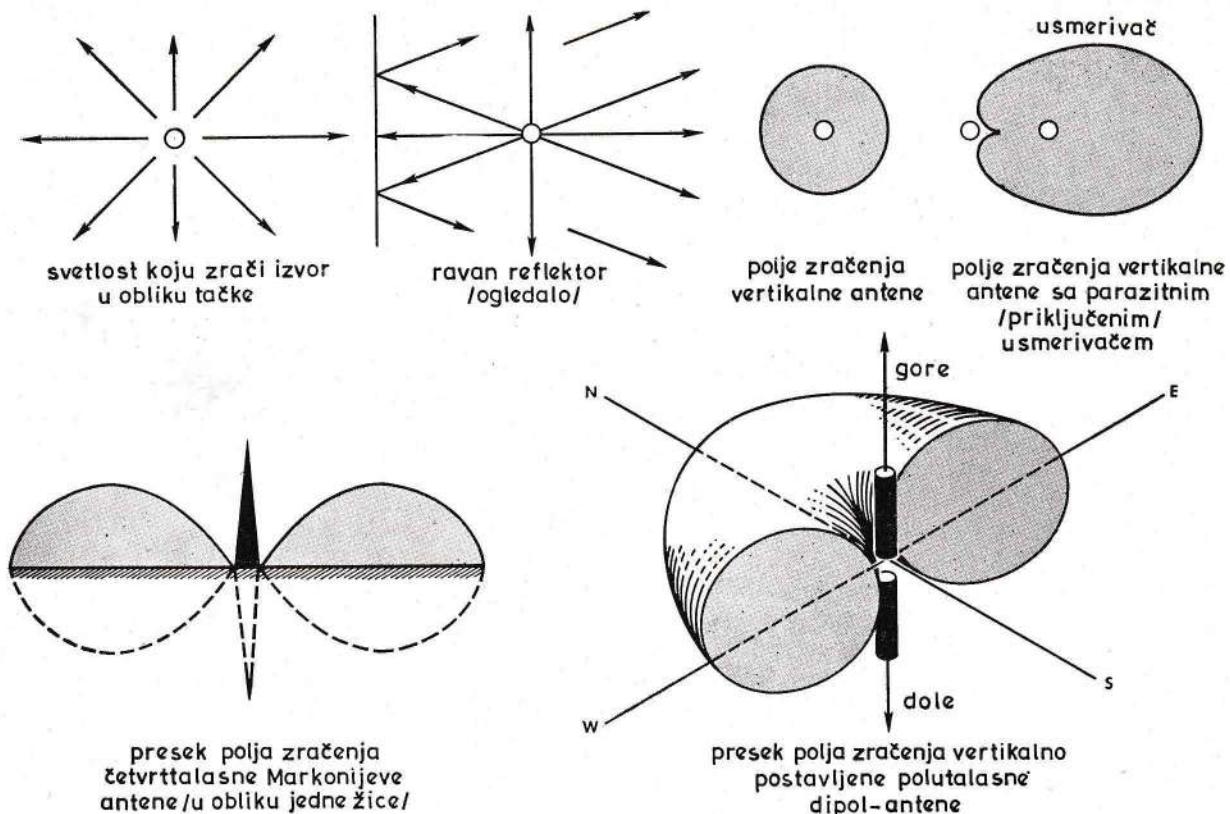
Do sada smo govorili o optičkim spravama koje se zasnivaju samo na optičkim principima. Na sledećim stranicama govoriti se o sličnosti između elektromagnetskih i svetlosnih talasa i o televizijskim cevima kojima su primjenjeni i elektronski i optički principi.

UPOREĐENJE SVETLOSNIH I ELEKTROMAGNETSKIH TALASA

Da bi se uočila sličnost između svetlosnih i elektromagnetskih talasa, valja obratiti pažnju na upoređenje optičkih sistema i antenskih sistema usmerenog dejstva, kao što su sistemi koji se upotrebljavaju u radio-goniometrima i radarima.

Iz izvora u obliku tačke svetlost zrači u prostor na sve strane; to jest, svetlosni zraci se rasprostiru u svim pravcima pravolinjski. Pomoću reflektora, sočiva i filtera svetlosni zraci se mogu po želji usmeravati, rasipati, skupljati, odabirati prema talasnoj dužini (boji) i fokusirati u određenim tačkama.

Elektromagnetski talasi sa vertikalne antene (tipa markoni), ili sa vertikalno postavljenog dipola rasprostiru se u obliku koncentričnih



Sl. 144 — Zračenje elektromagnetskih talasa antenom i svetlosno zračenje

polja u horizontalnoj ravni, kao što je prikazano na slici 144.

Pomoću odgovarajućih reflektora i usmeravajućih elemenata, elektromagnetsko zračenje se može tako usmeriti i koncentrisati da obrazuje dijagram usmerenosti željenog oblika. I faziranjem ili napajanjem dvaju ili više antenskih elemenata putem određenog pomeranja faza može se postići da polja koja se obrazuju oko svakog elementa jedno drugo pojačavaju ili potiru. Ovo pojačavanje ili potiranje vrši se na taj način što se pojedinačna polja vektorski kombinuju da bi proizvela polje zračenja maksimalnog intenziteta u željenom pravcu, i to bilo u horizontalnoj, bilo u vertikalnoj ravni, ili u obema.

Tamo gde se zahteva uzak a intenzivan snop energije, kao u radu pratećih radara, za obrazovanje snopa mogu se upotrebiti parabolični reflektori ili kombinacija reflektora i usmerivačkih elemenata. Ovaj se snop formira na potpunu isti način kao što se formira snop svetlosti pomoću reflektora i sočiva u lampi svetionika. U suštini, svaka je antena provodnik, ili sistem provodnika upotrebljenih za zračenje

ili prijem energije u vidu elektromagnetskih talasa. Visina zračećeg elementa iznad Zemlje, provodljivost Zemlje ispod njega, dužina talasa i oblik i dimenzije antene — sve to utiče na dijagram polja koje se zrači u prostor. Prema tome, određujući sve ove činioce moguće je prouzvjeti željeni dijagram zračenja.

Ako se želelo da se zračenje svetlosti jednog izvora usmeri u jednom pravcu, treba izvora da se namesti reflektujuća površina, tako da se svi zraci uprave prema predmetu koji treba da se osvetli. Zraci, koji bi normalno išli u pravcu koji je suprotan pravcu gde se nalazi predmet koji treba osvetliti, odbijaju se natrag ka predmetu i pojačavaju zrake koji normalno idu prema njemu.

Ako je predmet mali, ili ako je potrebno da se dobije maksimalni intenzitet osvetljenosti određene tačke na predmetu, može se postići da veliki broj zrakova padne na željenu tačku ako se upotrebni reflektor koji će upraviti zrake na nju. Reflektor određene krivine namešten na utvrđenom odstojanju od predmeta skuplja svetlosne zrake u dotoj tački na svojoj glavnoj osi.

Ali ako bi bilo nepoželjno ili nepraktično da se menja položaj izvora ili reflektora, onda se, kao što je prikazano na slici 145, radi fokusiranja odbijenih snopova može upotrebiti pokretno sočivo između objektiva i izvora.

Gore opisani efekti postignuti bilo pomoću svetlosnih, bilo pomoću visokofrekventnih elektromagnetskih talasa nastaju upotreboom paraboličnih reflektora. Da bi se prouzrokovalo rasipanje ili skupljanje elektromagnetskih talasa, mogu se upotrebiti parazitski (priključni) reflektori i direktori, koji u tom slučaju služe kao elektronska sočiva.

ELEKTRONSKI I OPTIČKI PRINCIPI TELEVIZIJSKE KAMERE

Dobar primer sprave u kojoj se primenjuju kako optički, tako i elektronski principi jeste televizijska kamera za snimanje. U upotrebi je nekoliko tipova tih elektronskih cevi i dok se one međusobno razlikuju u mehaničkim detaljima, principi na kojima funkcionišu su u osnovi isti. Razmotrićemo »ikonoskop«, cev koja je danas u širokoj upotrebi.

»Ikonoskop« se sastoji od staklenog omotača koji pomalo liči na lonac s dugačkom drškom. Strana omotača koja odgovara gornjem delu lonca je providan prozor koji dopušta da lik predmeta padne na zaklon ili *mozaik* sastavljen od mnogo hiljada fotoćelija u obliku loptica. Da bi se bacio snop elektrona na mozaik, upotrebljava se elektronski top sličan onim u običnoj katodnoj cevi.

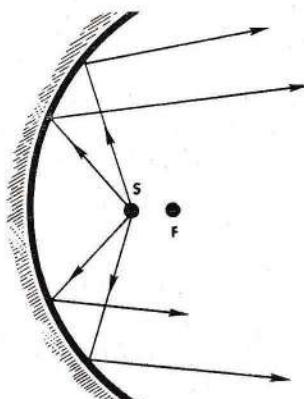
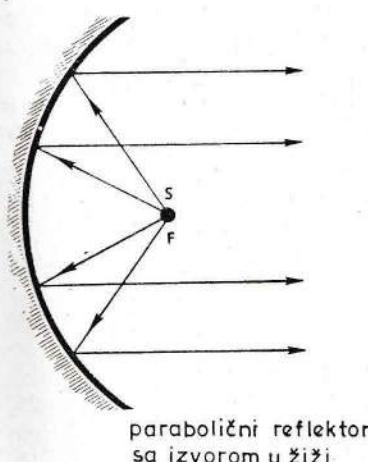
Taj snop, poznat kao snop za podrobno ispitivanje ili pretraživanje, utvrđenim redom prazni električno punjenje iz svakog dela ili svake

loptice mazaika. A čineći to on stvara električne impulse čija je jačina srazmerna količini svetlosti koju primi svaki deo mozaika. Ti impulsi služe za moduliranje amplitude nosećeg talasa i za stvaranje slike u televizijskom sistemu.

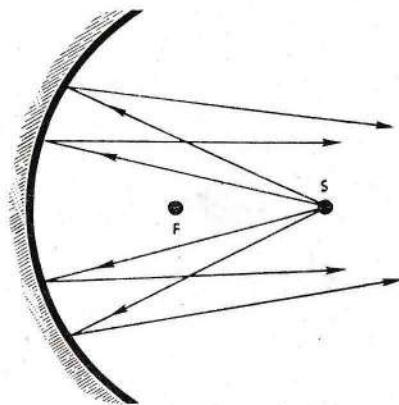
Slika »ikonoskopa« (slika 146) pokazuje neke od njegovih međusobno povezanih delova koji služe zato da promene u jačini svetlosti odbijene od predmeta čiju sliku treba preneti na daljinu pretvore u promene električnih impulsa.

Predmet ili prizor čiju sliku treba preneti na daljinu fokusira se na fotoosetljivi mozaik koji sadrži hiljade sićušnih loptica. Loptice su električno izolovane jedna od druge.

Fotoosetljivi zaklon sastoje se od tanke ploče liskuna. Na jednoj strani te ploče su loptice načinjene od jedinjenja srebra i cezijuma. Na zadnjoj strani liskunske ploče nalazi se tanka metalna naslaga koja služi kao zajednička elektroda. Svaka na svetlost osetljiva loptica je, u stvari, elektroda vrlo malog kondenzatora, dok metalna naslaga na poledini liskunske ploče služi kao zajednička elektroda za sve loptice. Na taj način, mozaik se sastoji od mnoštva sićušnih kondenzatora koji svi imaju zajedničku elektrodu, pa kad se optička slika fokusira tako da padne na njega, odbijeni zraci udaraju u sićušne fotoćelije i nateruju ih da otpuštaju elektrone. Kao što je ranije rečeno, broj elektrona koje svaki sićušni elemenat gubi srazmeran je jačini svetlosnog zraka koji udara u njega. Ove oslobođene elektrone privlači kolektorski prsten (grafitna naslaga) na unutrašnjoj površini cevi. Loptice iz kojih su elektroni oslobođeni sada imaju pozitivno punjenje u odnosu na zadnju stranu ili skupljujuću elektrodu mozaika.

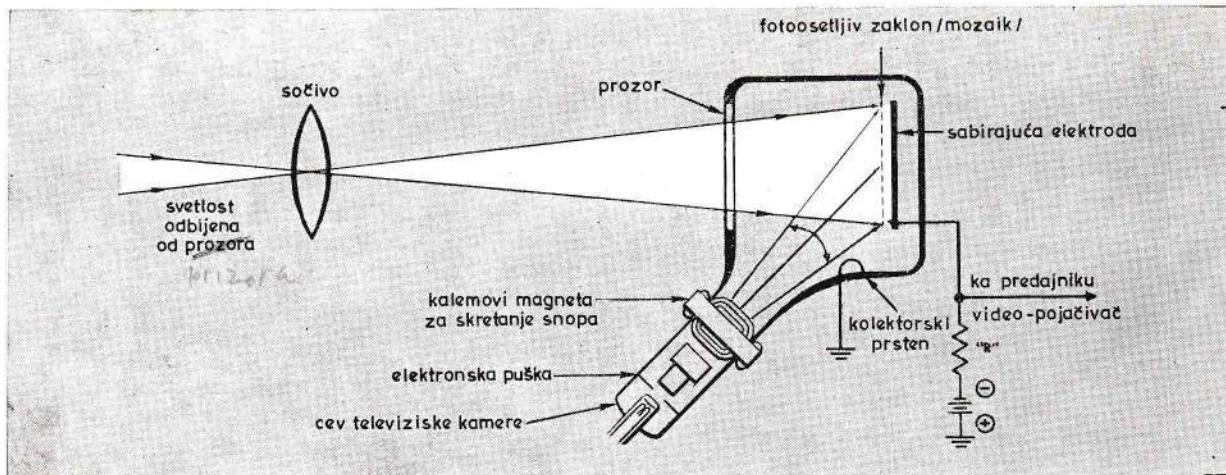


parabolični reflektor sa izvorom koji je bliži nego žiža /efekat rasipnog sočiva/



parabolični reflektor sa izvorom koji je dalji nego žiža /efekat sabirnog sočiva/

Sl. 145 — Odbijeni snop može se fokusirati upotrebom pokretnog sočiva



Sl. 146 — Ikonoskop pronalazi sliku prizora koja treba da se prenese na daljinu

Delovi mozaika koji su najsjajnije osvetljeni emituju najveći broj elektrona, pa stoga imaju najveće pozitivno punjenje.

Posebno ekspozicije mozaik se deo po deo podrobno ispituje elektronskim snopom kojeg stvara elektronski top, a sistem magneta ga skreće utvrđenim redom. Ovaj snop neutrališe svaki elemenat mozaika i dovodi do toga da struja teče kroz kolektor i otpornik (na slici označen sa »R«) u količini srazmernoj pozitivnom punjenju koje postoji na svakom elementu pogodjenom ispitivačkim snopom.

Impuls napona stvoren na drugoj strani otpornika predstavlja video-signal; on se pojačava do visine koja je potrebna za modulaciju predajnikovog nosećeg talasa. Znači, slika se prenosi do prijemnika u obliku nosećeg talasa modulirane amplitude.

Prijemnik ima običan pojačivač i demodulirajući sistem da bi iz nosećeg talasa izdvojio ono što talas nosi. To se izdvajanje vrši u obliku promenljivog napona koji se prenosi na signalnu (kontrolnu) mrežu katodne cevi za prijem slike, ili kineskopa na čijem se ekranu slika reprodukuje.

Prema tome, prizor se pomoću kombinovanih optičkih i elektronskih procesa prenosi pretvaranjem razlike u osvetljenju u razlike u struji i, zatim, ponovo u razlike u osvetljenju. Na taj način slika se može preneti na zнатна odstojanja.

ZAKLJUČAK

Kao što je ranije rečeno, cilj ovog odeljka bio je da se ukaže na sličnost između osobina svjetlosti i osobina prostiranja radio-talasa i da se pokaže kako elektromagnetski i svetlosni talasi mogu zajedno da funkcionišu skupa u elektronskoj opremi.

Optički sistem upravlja energijom zračenja pomoću ogledala, reflektora, prizmi i sočiva, tako da se energija zračenja može pretvoriti u oblik koji odgovara nameni; antenski sistem jednim delom upravlja elektromagnetskim zračenjem takođe pomoću reflektora i sočiva (usmerivača). Kad se budu proučavali sistemi za upravljanje i navigaciju projektila, uvideće se da ova informacija može pomoći da se jasno shvate ti sistemi.

FIZIKA TRANZISTORA

Tranzistori su zamena u obliku kristala za obične vakumske elektronske cevi. Oni će moći da zamene vakumske cevi u mnogim vrstama vazduhoplovnih elektronskih uređaja. Prednosti korišćenja tranzistora postaće jasne po čitanju ovog odeljka.

Od prvih dana doba radija, kada je Pikar (Pickard) prvi otkrio sposobnost nekih kristala da usmeravaju struju kod izvesnih kristala, obimna istraživanja dovele su do stalnog porasta korišćenja kristala u elektronskoj primeni. Primena kristala naročito je pogodna u uređajima za koje su zapremina i težina bitne činjenice.

Kvarcni kristali obilato se koriste za kontrolisanje učestanosti oscilatora; rošelske soli primenjuju se u piezoelektričnim uređajima kao što su gramofonski merni pretvarači i mikrofoni; galenski i silikonski kristali mnogo se koriste u visokofrekventnim i ultravisokofrekventnim radarima kao detektori i sabirači. Svaki od ovih kristala raspolaže izvesnim odlikama koje ga čine pogodnim za neku određenu primenu. Ali najmnogostraniji do danas pronađeni kristal je kristal germanijuma.

Tek poslednjih godina saznalo se za mnogostrana svojstva germanijuma primjenjenog u elektronici. Germanijum u kristalnom obliku otada je postao značajan za elektroniku, što je dovelo do razvoja čitave porodice kristalnih trioda, tetroda i pentoda, poznatih kao tranzistori.

STRUKTURA KRISTALA I ATOMA

Da bi se razumela teorija tranzistora, korno je da se ukratko objasni struktura atoma i kristala.

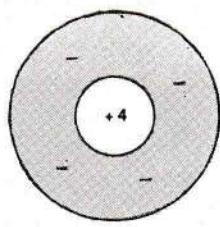
Kao što je poznato, materije su sastavljene od jednog elementa ili više elemenata, a svaki elemenat sastavljen je od atoma. Atom, opet, sastavljen je od manjih delova materije nazvanih elektronima, protonima i neutronima. Elektroni raspolažu negativnim nabojem; protoni poseduju odgovarajući pozitivni naboј i teži su više nego 1800 puta od elektrona. Neutron nema električnog naboja i iste je mase kao proton.

Atom koji predstavlja najmanji delić elemenata, koji raspolaže svim osobinama elemenata, sastavljen je od jezgra koje sačinjavaju protoni i neutroni oko kojih se obrću laci elektroni. Kod normalnog atoma postoji izvan jezgra toliko elektrona (jedinica negativnog naboja) koliko u jezgru ima protona (jedinica pozitivnog naboja). Na taj način atom je uravnotežen ili električno neutralan.

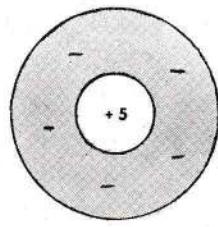
Atomi jednog hemijskog elementa razlikuju se od atoma drugog elementa samo po broju elektrona, protona i neutrona. U odnosu na tranzistore, razmotriće se samo nekoliko elemenata. To su germanijum, silicijum, antimон, arsen, aluminijum, galijum, indijum i talijum.

Proučavanje atomske strukture pokazalo je da je veliki deo elektrona oko jezgra čvrsto vezan za njega i da ne stupa u hemijske reakcije ili tranzistorske pojave. Jezgro i čvrsto povezani elektroni sačinjavaju, dakle, inertan središnji deo sa pozitivnim električnim nabojem oko kojeg se okreću manje tesno vezani elektroni.

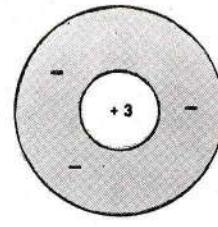
U tranzistorskoj fizici govoriće se o naboju središnjog dela i elektrona koji opkoljavaju jezgro. Na primer, svaki atom germanijuma ima 32 protona u svom jezgru i 28 tesno vezanih elektrona oko njega. Tako se atomi germanijuma mogu predstaviti središnjim delom sa na-



Sl. 147 — Atomske strukture germanijuma ili silicijuma



Sl. 148 — Atomske strukture antimona ili arsena (davaoci)



Sl. 149 — Atomske strukture aluminijuma, galicijuma ili talijuma (primaoci)

bojem +4 opkoljenim sa 4 elektrona. Svaki atom silikona, koji ima 14 protona u svom jezgru i 10 tesno vezanih elektrona oko njega, predstavljen je na isti način kao atom germanijuma, kao što je prikazano na slici 147.

Čisti germanijum ne može se koristiti za proizvođenje tranzistora, pošto germanijum dobija osobinu da ispravlja i pojačava struju samo prisustvom nečistoće u kristalima. Jedna vrsta nečistoće poznata je kao *davalac*, a druga vrsta naziva se *primaocem*. Oni se tako zovu zbog načina na koji utiču na kretanje elektrona i tranzistora.

Antimon i arsen postaju *davaoci* kada se pridruže kristalnoj strukturi germanijuma. Naboj središnjih delova atoma antimona i arsena iznosi +5. Svaki atom ima 5 elektrona koji opkoljavaju njegov središnji deo, kao što je prikazano na slici 148.

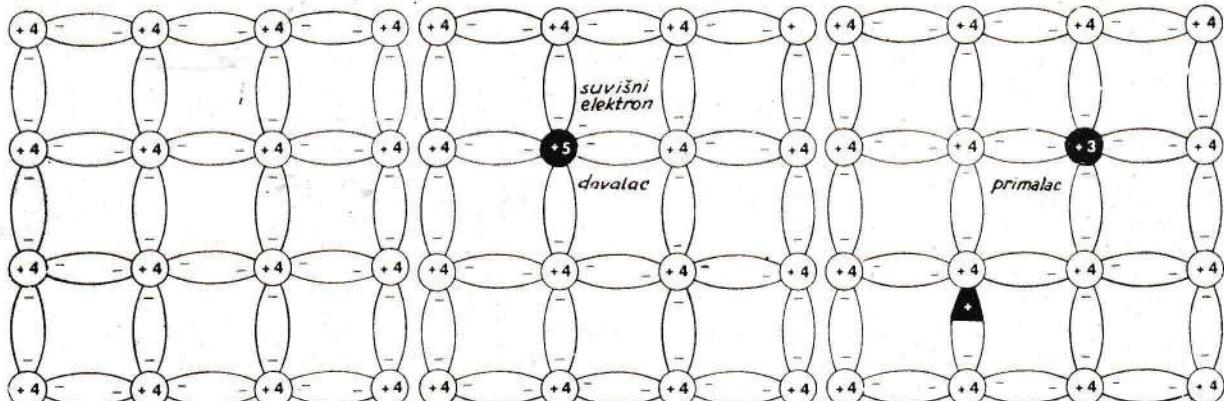
Aluminijum, galijum, indijum i talijum postaju primaoci kad se pridruže strukturi germanijuma. Električni naboji središnjih delova njihovih atoma iznosi +3 i svaki od njihovih atoma raspolaže sa 3 elektrona koji opkoljavaju njegov središnji deo. Atomska struktura ovih primalaca prikazana je na slici 149.

Slika 150 upoređuje atomske uslove koji postoje kod kristala čistog germanijuma, sa onima kod kristala koji sadrže nečistoću u obliku davalaca i primalaca.

U čistom kristalu svaki atom ima četiri suseda koji su podjednako udaljeni jedni od drugih. Između središnjih delova atoma i svakog od njihovih suseda nalaze se po dva elektrona (osenčena površina). Ovi parovi elektrona obrazuju *parne veze elektrona* koje se pojavljuju kada se dva ili više atoma približe jedan drugom. Pošto su elektroni u stalanom kretanju oko središnjog dela, ove parne veze elektrona nastaju kada se kretanje jednog elektrona koordiniše sa kretanjem elektrona sa drugog atoma.

Ova koordinacija teži da međusobno privuče središne delove jedan prema drugome, ali se pozitivni naboji središnjih delova odbijaju jedan od drugog dok ne postignu savršenu ravnotežu privlačenja i odbijanja. Tada se kaže da se atomi nalaze u stanju ravnoteže.

Kao što je već ranije pomenuto, kristali čistog germanijuma ne mogu se koristiti kao tranzistori. Ovo zato jer su tada atomi kristala u stanju ravnoteže, pa u tom obliku predstavljaju dobre izolatore sa električnom konstantom od približno 16.



Struktura atoma germanijuma ili silicijuma

Struktura atoma antimona ili arsena (davači)

Struktura atoma aluminijuma, galijuma ili talijuma (primaoci)

Sl. 150 — Atomski uslovi u kristalima germanijuma

UTICAJI ATOMA-DAVALACA NA KRISTALE GERMANIJUMA

Kada atom-davalac (antimona ili arsena) sačinjava deo kristalne strukture germanijuma, on mora da izgubi jedan od pet elektrona koji opkoljavaju njegov središni deo, pošto samo četiri njegova elektrona mogu da obrazuju parne veze elektrona sa elektronima njemu susednih atoma germanijuma. Stoga je suvišni elektron slobodan i može se kretati kroz srazmerno širok prostor između središnjih delova. On se kreće kroz kristal kao kroz vakuum.

Ukoliko bi se na kristal priključila baterija, elektron bi se krećao prema njenom pozitivnom kraju i ušao u bateriju na toj tački. Nastala bi neprekidna struja elektrona kroz kristal, ali bi središni delovi germanijuma i atoma-davalaca ostali neporemećeni.

Kristali germanijuma koji sadrže nečistoće u obliku davalaca poznati su kao germanijum vrste N. Primetno je da oznaka »N« potiče od činjenice da je provođenje kroz kristal uglavnom provođenje negativnih naboja u obliku suvišnih elektrona iz atoma-davalaca. Upravo ova akcija doveća je do toga da se za ovakav elemenat primeni naziv *davalac*. Kada se taj elemenat pridruži kristalnoj strukturi germanijuma, on odaje suvišni elektron.

UTICAJI ATOMA-PRIMALACA NA KRISTALE GERMANIJUMA

Kada se atom-primalac (aluminijuma, galijuma, indijuma ili talijuma) pridruži kristalnoj strukturi germanijuma, on time prima jedan elektron od jednog njemu susednog atoma germanijuma. Atomi primalaca raspolažu sa tri elektrona koji opkoljavaju svaki od njihovih središnjih delova, dok središne delove atoma germanijuma opkoljavaju po četiri elektrona. Kada se obrazuje ova nova parna veza elektrona, nastaje rupa u drugoj parnoj vezi elektrona. Ova *rupa* ima ekvivalentan nalog kao elektron, ali je pozitivnog znaka.

Ogledi su pokazali da se ova *rupa* slobodno kreće kroz strukturu kristala, tako da se kroz kristal germanijuma može provoditi struja, ukoliko on sadrži primaoca, na isti način kao kroz onaj što ima davaoca. Međutim, proces provođenja je drukčiji.

Kada bi se na kristal priključila baterija, rupa bi bila privučena ka negativnom kraju baterije i jedan elektron sa ovog kraja ušao bi u kristal i popunio rupu.

Istovremeno, jedan elektron sa jedne od parnih veza elektrona u kristalu, blizu pozitivnog kraja baterije, odvojio bi se iz svoje veze

i ušao u bateriju, stvarajući na taj način drugu rupu u kristalu. Ova akcija bi se ponavljala i održavala neprekidno proticanje struje kroz kristal.

Kristali germanijuma koji sadrže nečistoće u obliku primalaca poznati su kao germanijum vrste P. Ovaj izraz izведен je na osnovu činjenice da takvi kristali provode uglavnom pozitivne naboje (rupe).

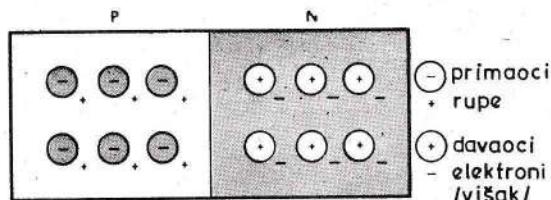
Jednom rupom može se definisati nepotpuna grupa elektrona čije su opšte osobine slične onima kod elektrona, osim što ona nisu pozitivan nalog umesto negativnog.

Primaocem se definiše elemenat koji kada se pridruži kristalnoj strukturi germanijuma, proizvodi rupu ili višak pozitivnog napona u kristalu.

VEZA VRSTE P — N

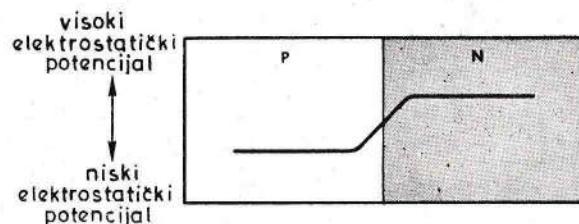
Treba imati na umu da su kristali germanijuma dobri provodnici i da mogu provoditi struju podjednako dobro u svim pravcima. Ispravljanje pomoću kristala germanijuma dešava se samo kada se germanijum vrste P i germanijum vrste N postave jedan pored drugog. Površina u kojoj se sastaju ove dve vrste germanijuma zove se veza P — N i akcija koja se vrši na spojevima čini osnovu rada tranzistora.

Slika 151 prikazuje vezu vrste P — N u stanju ravnoteže. Treba obratiti pažnju na to da se rupe nagomilavaju s leve strane atoma germanijuma vrste P, a viškovi elektrona s desne strane atoma germanijuma vrste N.



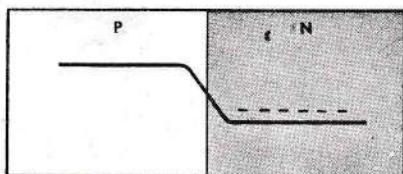
Sl. 151 — Veza P—N u uslovima ravnoteže

Ova pojava nastaje zahvaljujući raspodeli elektrostatickog potencijala koji proizvode atomi primaoca i atomi-davaoca, kako je to prikazano na slici 152.



Sl. 152 — Elektrostaticki potencijal

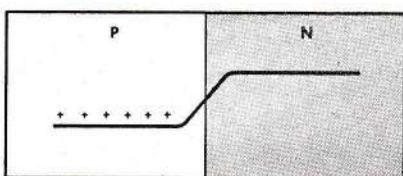
Elektroni ostaju u oblasti *najvišeg elektrostatičkog potencijala* a rupe u oblasti *najnižeg elektrostatičkog potencijala*. Kada je jedan elektron u oblasti najvišeg elektrostatičkog potencijala, njegova *potencijalna energija* je minimalna, što se vidi na slici 153. Pošto potencijalna energija predstavlja sposobnost za vršenje rada i s obzirom na to da elektron, pošto dostigne tačku najvišeg elektrostatičkog potencijala ne može da se kreće da bi vršio rad, postaje očigledno da se elektron nalazi u oblasti niske potencijalne energije.



Sl. 153 — Potencijalna energija elektrona

Ovu činjenicu valja imati na umu, pošto se dijagrami potencijalne energije često koriste da bi se prikazalo ponašanje tranzistora.

Ta istina može se primeniti u odnosu na rupe, jer kada se rupa nalazi u oblasti najnižeg elektrostatičkog potencijala (to znači niskog negativnog potencijala), njihova potencijalna energija nalazi se na minimumu, kako je to prikazano na slici 154.



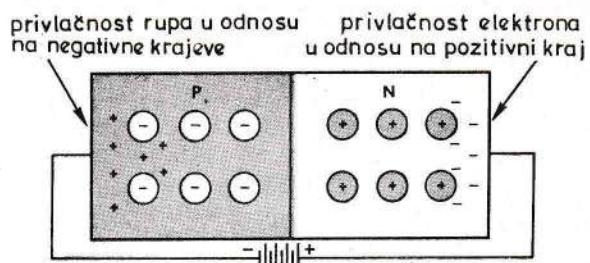
Sl. 154 — Potencijalna energija rupe

Rupe i elektroni protiču samo ka oblasti niske potencijalne energije. Oblast niske potencijalne energije za jedan elektron je oblast viške potencijalne energije za jednu rupu i obratno.

VEZA P — N SA OBRATNIM PREDNAPONOM

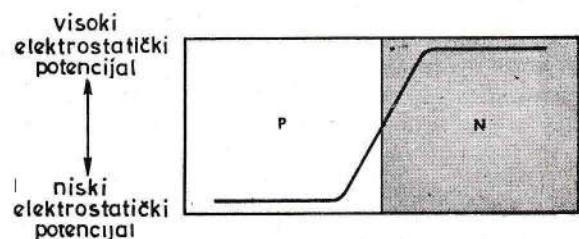
Ako se spoji jedna baterija sa germanijumovim kristalom vrste P—N, kao što je prikazano na slici 155, tada se ne provodi struja kroz kristal. Ovakva veza naziva se obratnim prednaponom.

Ovaj uslov nastaje kada se pozitivni kraj baterije spoji sa germanijumom vrste N, a negativni kraj sa germanijumom vrste P.



Sl. 155 — Veza P—N sa obratnim prednaponom

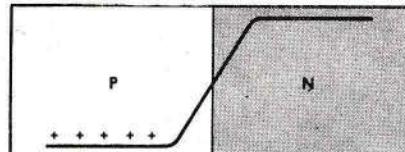
Pozitivni završetak baterije privlači elektrone i izaziva ih da se nagomilavaju udesno kada je veza u stanju ravnoteže. Negativni kraj baterije privlači rupe i izaziva njihovo prikupljanje ulevo, i to dalje nego kada je veza u stanju ravnoteže. Kao posledica ovih privlačenja nema proticanja elektrona ulevo, niti rupe udesno. Međutim, razlika u elektrostatičkom potencijalu između dve vrste germanijuma povećana je kao što je prikazano na slici 156.



Sl. 156 — Povećani elektrostatički potencijal kod veze P—N sa obratnim prednaponom

Greben potencijalne energije za rupe je povećan, zato one neće proticati uz strminu grebena. Ovaj uslov prikazan je na slici 157.

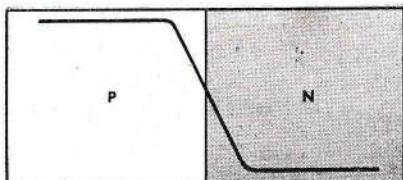
Isti uslov važi i za greben potencijalne energije za elektrone, te se na taj način sprečava da oni protiču.



Sl. 157 — Potencijalna energija rupa. Greben je povećan zahvaljujući obratnom prednaponu

VEZA P — N SA DIREKTNIM PREDNAPONOM

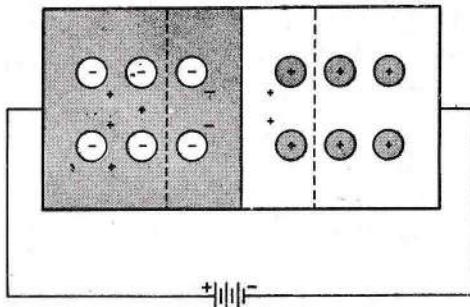
Kada bi se jedna baterija spojila sa kristalom germanijuma vrste P — N, sa pozitivnim krajem vezanim za germanijum vrste P a negativnim sa germanijumom vrste N, struja bi proticala i bila srazmerna korišćenom naponu.



Sl. 158 — Potencijalna energija elektrona. Greben je povećan zahvaljujući obratnom prednaponu

Ova vrsta spoja poznata je kao *direktni prednapon*.

Kako je to prikazano na slici 159 pozitivni završetak baterije odbija rupe i izaziva njihovo kretanje prema germanijumu vrste N. Neke od ovih rupa ulaze u oblast »N«.

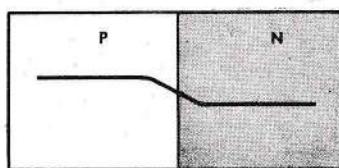
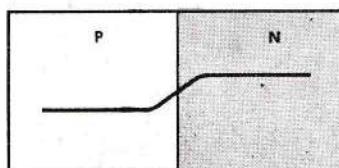
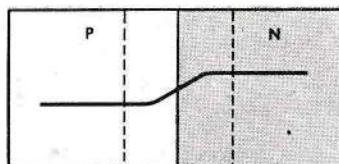


Sl. 159 — Veza P—N sa direktnim prednaponom

Negativni kraj baterije odbija elektrone i izaziva njihovo kretanje ka germanijumu vrste P. I u ovom slučaju neki elektroni ulaze u oblast »P«.

Elektroni i rupe kombinuju se u maloj površini difuzije na obe strane veze P — N (između isprekidanih linija na dijagramu). Za svaku rupu u oblasti »P« koja se kombinuje sa jednim elektronom iz oblasti »N«, jedan elektron iz parne veze elektrona u kristalu blizu pozitivnog kraja baterije ulazi u bateriju na njenom pozitivnom završetku. Ova akcija izaziva nastajanje nove rupe koja se kreće ka germanijumu vrste N. Za svaki elektron koji se kombinuje sa jednom rupom u germanijumu vrste N, jedan elektron ulazi u kristal sa negativnog završetka baterije. Proticanje struje u oblasti »P« je uglavnom protok rupa, dok kroz oblast »N« uglavnom protiču elektroni.

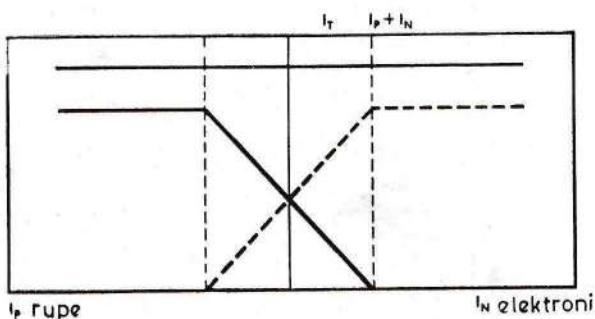
Uslovi potencijalne energije koji postoje prilikom primene direktnog prednapona prikazani su na slici 160.



Sl. 160 — Uslovi potencijalne energije usled primene prednjeg prednapona

Struje koje protiču kroz kristal prikazane su na slici 161. Ukupna struja (I_T) je konstantna; struja rupa (I_P) prikazana je debelom linijom, a struja elektrona (I_N) isprekidanom linijom.

Na osnovu gornje teorije može se potpunije razumeti proces ispravljanja u kristalima germanijuma. Može se bolje razumeti kako kristal dejstvuje kao mali otpornik kada se primenjuje direktni prednapon (+ za P, — za N) i kako on dejstvuje kao veliki otpor kada se primenjuje obratni prednapon (— za P, + za N). Ove pojave sačinjavaju osnovni princip rada tranzistora.



Sl. 161 — Proticanje struje kroz kristal prilikom primene prednjeg prednapona

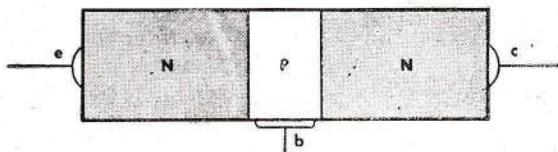
Tranzistori se dele u dve opšte grupe: površinski tranzistori i tranzistori sa tačkastim spojem.

POVRŠINSKI TRANZISTORI N — P — N i P — N — P

U ovom odeljku raspravljaće se o N — P — N i P — N — P površinskim tranzistorima. Tranzistor N — P — N konstruisan je postavljanjem jedne uske trake germanijuma vrste P između dve srazmerno dugačke trake germanijuma vrste N. I, kao što to prikazuju slova, tranzistor P — N — P sastoji se od jedne uzane trake germanijuma vrste N između dve srazmerno duge trake germanijuma vrste P.

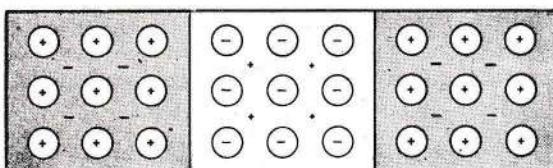
POVRŠINSKI TRANZISTORI N — P — N

Jedan površinski tranzistor N-P-N prikazan je na slici 162. Kod ove vrste spojevi su izrađeni na velikoj površini (s malim otporom), na



Sl. 162 — Površinski tranzistor N-P-N

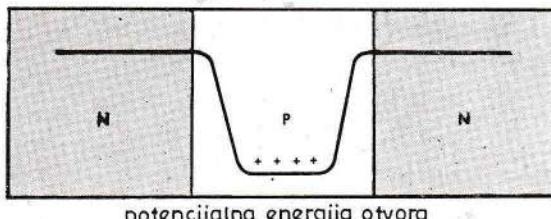
svakoj traci. Germanijum vrste N, kao što je prikazano na levoj strani slike, naziva se emitor (e). Traka vrste N, prikazana na desnoj strani slike, naziva se kolektorm (c). Deo vrste P u sredini zove se baza (b).



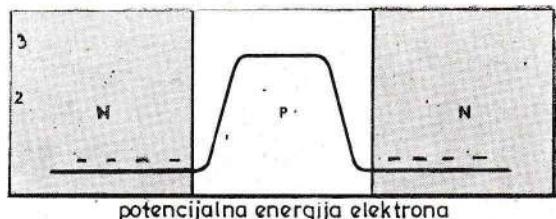
Sl. 163 — Površinski tranzistor u stanju ravnoteže

Na slici 163 prikazana je podela davalaca, primalaca, rupa i elektrona u jednom površinskom tranzistoru pod ravnotežnim uslovima (bez primene spoljnih napona).

Potencijalna energija rupa kod ove vrste tranzistora predstavljena je na slici 164.



Sl. 164 — Potencijalna energija rupe kod površinskog tranzistora N-P-N



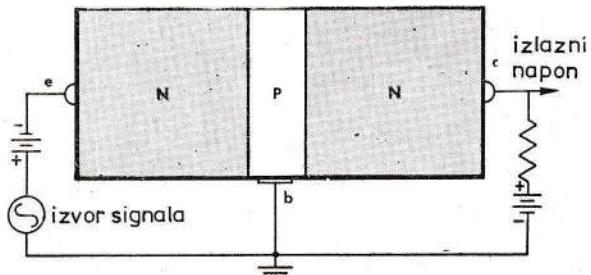
Sl. 165 — Potencijalna energija elektrona kod površinskog tranzistora N-P-N

Slika 165 prikazuje potencijalnu energiju elektrona.

Rupe su koncentrisane u oblasti za njih najniže potencijalne energije. One ne mogu da se penju uz grebene potencijalne energije s desne ili sa leve strane.

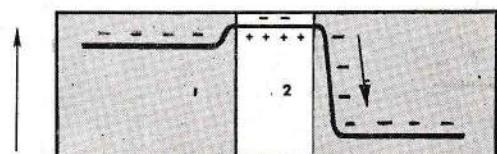
Elektroni su koncentrisani u oblasti za njih najniže potencijalne energije i ne mogu se penjati uz grebene potencijalne energije da bi ušli u germanijum vrste P. Na taj način nema proticanja struje.

U praktičnoj primeni, površinskom tranzistoru N-P-N normalno se daje prednapon na način prikazan na slici 166. Veza P — N između emitora (e) i baze (b) dobija prednapon u direktnom pravcu. Veza P — N između kolektora (c) i baze (b) dobija, opet, prednapon u obatnom pravcu.



Sl. 166 — Radno strujno kolo sa površinskim tranzistorom N-P-N

Slika 167 pokazuje uslove potencijalne energije za elektrone, kada se ne dovodi signal. Kod tranzistora N-P-N, elektroni predstavljaju najveći deo strujnih komponenata, tako da dijagrami potencijalne energije za rupe nisu prikazani.



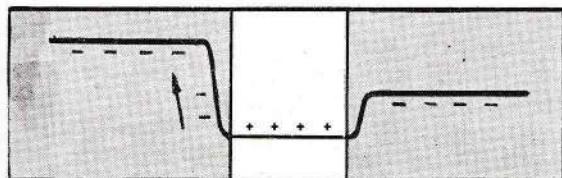
Sl. 167 — Potencijalna energija jednog elektrona (bez signala)

Direktan prednapon koji se primjenjuje između emitora i baze smanjuje greben potencijalne energije na levoj strani veze P — N, tako da se neki elektroni penju uz njega i ulaze u germanijum vrste P. Pošto je traka osnove srazmerno tanka, većina elektrona koji ulaze neće da se kombinije sa rupama. Umesto toga oni prolaze kroz traku i odmah se spuštaju niz padine potencijalne energije na desnoj vezi P — N, kako je to prikazano strelicom na slici 167.

Strma padina potencijalne energije, koja omogućava da elektroni lako ulaze iz trake baze ka germaniju vrste N kolektora, nastaje primenom obratnog prednapona između kolektora i baze.

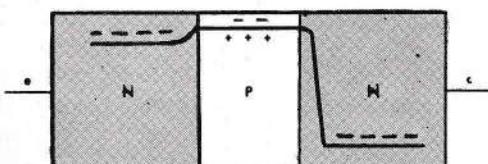
Kada se uvede signal koji se suprotstavlja direktnom prednapanu emitora (čini bazu više negativnom u odnosu na emitor), greben potencijalne energije između emitora i baze povećava se i zato se manje elektrona penje uz greben radi ulaženja u germanijum vrste P.

Elektroni koji ulaze u germanijum vrste P ne rekombinuju se sa rupama, nego padaju u oblast kolektora sa niskom potencijalnom energijom.



Sl. 168 — Ulazni signal površinskog tranzistora N-P-N čini osnovu više negativnom u odnosu na predajnik

Kada polaritet primjenjenog signala pomaže direktni prednapon (čini bazu više pozitivnom u odnosu na emitor), greben potencijalne energije između emitora i baze se smanjuje i više elektrona protiče u oblasti vrste P. Većina ovih elektrona se ne kombinuje sa rupama, nego lako protiče ka nivou niske potencijalne energije germanijuma vrste N kolektora. Ovaj uslov prikazan je na slici 169.



Sl. 169 — Ulazni signal kod površinskog tranzistora N-P-N čini bazu više pozitivnom u odnosu na emitor

Rad površinskog tranzistora N-P-N može se porebiti sa radom triodne vakuumske cevi. Emitor je ekvivalentan katodi, baza rešetki, a kolektor anodi.

Praktično, svi elektroni koji se pojavljuju iz emitora (katode) kreću se prema kolektoru (anodi). Struja u bazi (rešetki) je minimalna i sastoji se samo od malog broja elektrona koji predstavljaju broj rekombinacija repa i elektrona u oblasti vrste P.

Kod vakuumske cevi postoje dve vrste struje, kao i kod tranzistora. Termojonski elektroni cevi (oni koje emituje katoda) ekvivalentni su višku elektrona sa emitora.

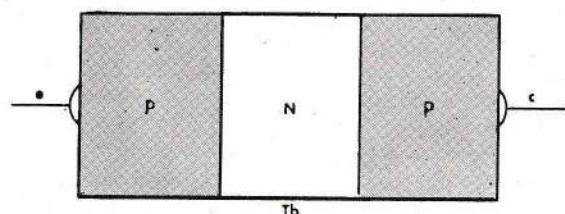
Minimalna struja provođenja elektrona (onih koji pritiču ka rešetki i otiču od nje regulišući anodnu struju) jednaka je slaboj struci rupa u oblasti baze (koja se menja da bi se kontrolisala struja kolektora).

POVRŠINSKI TRANZISTORI P-N-P

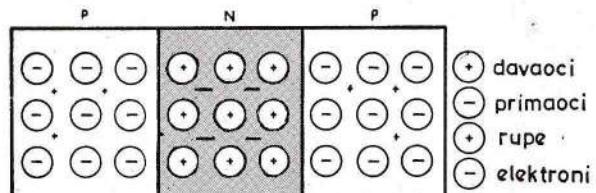
Kao što je ranije rečeno, površinski tranzistor P — N — P sastoji se od uzane trake germanijuma vrste N, između dve srazmerno dugačke trake germanijuma vrste P. Veliki površinski spojevi (s malim otporom) vode do svake trake. Spojevi su nazvani b, c, i e, što predstavlja bazu, kolektor i emitor, kao u slučaju tranzistora N — P — N.

Rad površinskog tranzistora P — N — P analogan je radu onog vrste N — P — N, osim što rupe sačinjavaju glavnu komponentu struje umesto elektrona.

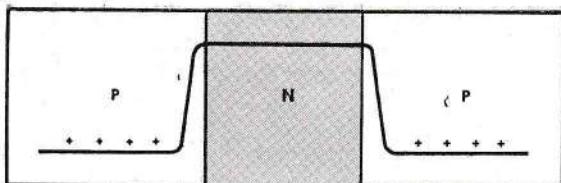
Na slici 171 prikazan je tranzistor P—N—P u stanju ravnoteže.



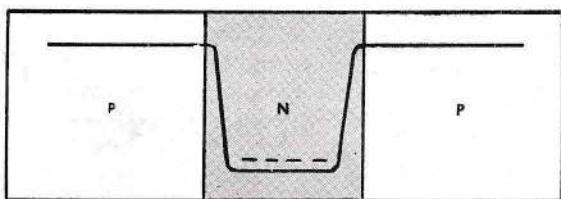
Sl. 170 — Površinski tranzistor P-N-P



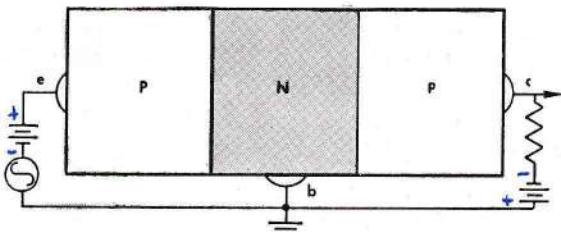
Sl. 171 — Površinski tranzistor P-N-P u stanju ravnoteže



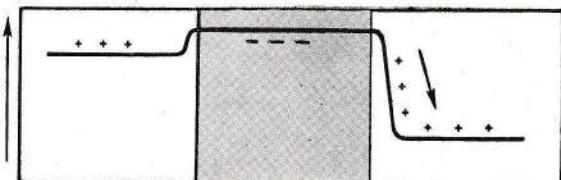
Sl. 172 — Potencijalna energija rupe



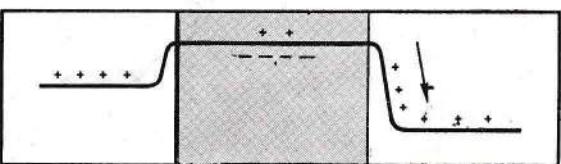
Sl. 173 — Potencijalna energija elektrona



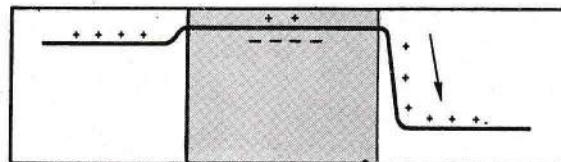
Sl. 174 — Radno strujno kolo sa površinskim tranzistom P-N-P



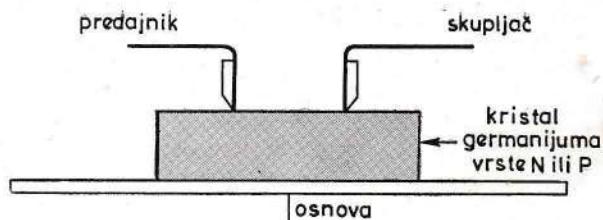
Sl. 175 — Tranzistor P-N-P (bez signala)



Sl. 176 — Uzlazni signal tranzistora P-N-P čini bazu više pozitivnom u odnosu na emitor



Sl. 177 — Uzlazni signal tranzistora P-N-P čini bazu više negativnom u odnosu na emitor



Sl. 178 — Tranzistor sa tačkastim spojem

Slike 174, 175, 176 i 177 prikazuju uslove rada površinskog tranzistora P — N — P na isti način kao što su ranije slike prikazivale uslove rada tranzistora N — P — N.

Treba zapaziti da emitor treba da se učini pozitivnim u odnosu na bazu, kako bi davao prednapon vezi P-N, između emitora i baze tranzistora P-N-P u direktnom smeru. A da bi se dao prednapon kolektoru u obratnom pravcu, kolektor treba učiniti negativnim u odnosu na bazu.

Suvišni elektron je ključni činilac u radu površinskog tranzistora P-N-P, ali je zato rupa glavna komponenta struje. Osnovni uslovi koji određuju potencijalnu energiju rupe prikazani su na propratnim slikama.

Kao što je poznato, spojevi emitora, baze i kolektora sa kristalom imaju u površinskom tranzistoru, niskootporni karakter (veliku površinu). Po tome se površinski tranzistori razlikuju od tranzistora sa tačkastim spojem, kao i vezom osnove.

TRANZISTORI SA TAČKASTIM SPOJEM

Kod jednog tranzistora sa tačkastim spojem, emitor i kolektor vezani su za kristal tačkastim spojem (srazmerno veliki otpor i mala površina). Slika 178 prikazuje u preseku izgled ove vrste tranzistora. Veza baze, kako se vidi, predstavlja spoj sa velikom površinom i malim otporom.

Kao što je već rečeno, struja emitora veća je od struje kolektora kod površinskog tranzistora, a struja baze je beskrajno mala. Ogledom je nađeno da je u tranzistoru sa tačkastim spojem struja kolektora (nasuprot površinskom tranzistoru) znatno veća nego struja emitora, kao i da je struja baze srazmerno velika.

O ovim razlikama između površinskog tranzistora i tranzistora sa tačkastim spojem govorice se u sledećim odeljcima.

Iako tranzistor sa tačkastim spojem koristi ono što se smatra da je ili samo germanijum vrste N ili samo germanijum vrste P, eksperimentalna ispitivanja pokazala su da se u tranzistorima sa tačkastim spojem vrste N javljaju slojevi vrste P, a u tranzistorima sa tačkastim spojem vrste P javljaju slojevi vrste N.

TRANZISTORI SA TAČKASTIM SPOJEM VRSTE N

Slika 179, na kojoj je prikazan tačkasti tranzistor vrste N, pokazuje da se ispod tačke emitora nalazi tanki sloj germanijuma vrste N (N_2), iza kojeg sledi tanki sloj germanijuma vrste P (P_2).

Iz ovog crteža može se videti da je delu baza-emitor dat prednapon u direktnom smeru. Nastaje protok struje, koji se sastoji uglavnom od rupa u germaniju vrste P_1 i elektrona u germaniju vrste N_1 . Pod ovim uslovima, povećanje struje emitora izaziva veliko povećanje struje kolektora, a smanjenje struje emitora izaziva veliko smanjenje struje kolektora.

Pojačavanje struje. Da bi se bolje razumelo pojačavanje struje pomoću tranzistora sa tačkastim spojem, razmatraće se kolektorsko-bazno strujno kolo tranzistora. Na slici 180 prikazano je, povećano, strujno kolo između kolektora i baze.

Potencijalna energija elektrona u kristalnom delu ovog strujnog kola prikazana je na slici 181. U neporemećenim uslovima (bez uvođenja signala), malo elektrona se penje uz greben potencijalne energije između N_2 i P_2 . Oni, pak, koji se popnu uz greben, ne kombinuju se sa rupom u oblasti P_2 , jer je ona uzana. Umesto toga, ovi elektroni brzo padaju dole niz potencijalnu padinu između P_2 i N_2 .

Kada oblast emitor-baza vrši provođenje, neke od rupa koje napuštaju oblast P_1 emitora pomeraju se u oblast P_2 kolektora. Sa rupama u oblasti P_2 sa emitora, dijagram potencijalne energije za elektrone između kolektora i baze (slika 182) slaže se sa onim na slici 181.

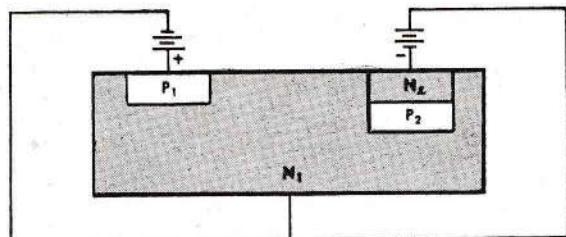
Treba istaći da je greben potencijalne energije između N_2 i P_2 znatno smanjen i elektroni u oblasti N_2 mogu lako da se popune u oblast P_2 .

Većina ovih elektrona, umesto da se kombinuju sa rupama u ovoj oblasti, brzo padaju u oblast osnove N_2 . Za svaku rupu koja ulazi u oblast P_2 iz oblasti P_1 , mnogi elektroni teku iz oblasti N_2 kroz oblast P_2 u oblast N_1 . Tako postaje očigledno nastajanje velikog pojačavanja struje.

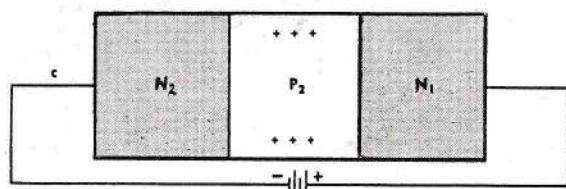
Ovo pojačavanje struje izražava se sa α (alfa) i ekvivalentno je stepenu pojačavanja napona jedne vakuumskе cevi (μ). Ono se matematički predstavlja:

$$\alpha = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_e}$$

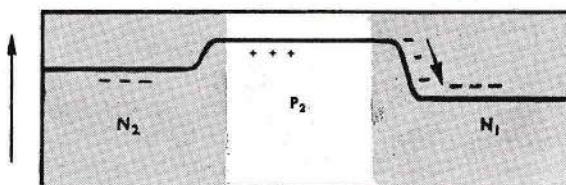
gde je ΔI_c mala promena u struci kolektora, a ΔI_e mala promena u struci emitora.



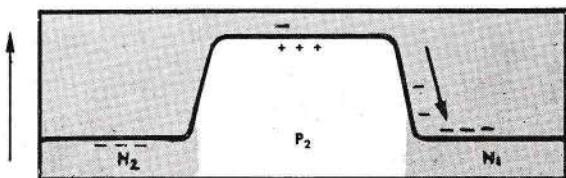
Sl. 179 — Konstrukcija tranzistora sa tačkastim spojem vrste N



Sl. 180 — Strujno kolo kolektor — baza sa tranzistorom sa tačkastim spojem vrste N



Sl. 181 — Potencijalna energija elektrona bez rupa od emitora

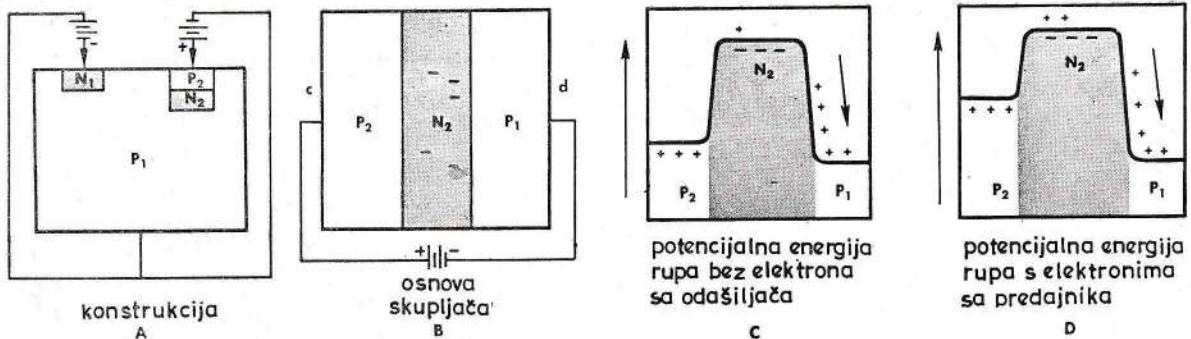


Sl. 182 — Potencijalna energija elektrona sa rupama od emitora

TRANZISTORI SA TAČKASTIM SPOJEM VRSTE P

Tranzistori sa tačkastim spojem izrađuju se od germanijuma vrste P kao glavnog tela. Teorija koja objašnjava rad ove vrste tranzistora sličan je onoj koja objašnjava rad vrste N. Razlika je u tome da se glavni nosač struje sastoji od rupa umesto od elektrona.

Prethodni odeljci, zajedno sa slikom 183, objasniće čitaocu teoriju rad tranzistora sa tačkastim spojem vrste P. Treba primetiti da je polaritet emitora u odnosu na bazu i kolektora u odnosu na bazu morao da se promeni.



Sl. 183 — Tranzistor sa tačkastim spojem vrste P

POREĐENJE TRANZISTORA SA TAČKASTIM SPOJEM SA TRIODNOM VAKUUMSKOM CEVI

Rad tranzistora sa tačkastim spojem može se porediti sa radom jedne vakuumske triodne cevi. Emitor je ekvivalentan rešetki, baza katodi a kolektor anodi. Struja baze tranzistora je сразмерно jaka i njen najveći deo ide na kolektor. Za razliku od rešetke jedne vakuumske cevi, emitor vuče neprekidnu struju.

Kod tranzistora sa tačkastim spojem ulazna impedanca (emitora) je niska a izlazna impedanca (kol.) visoka. Kod vakuumske cevi impedanca rešetke je visoka a izlazna impedanca (anoda) je niska. U sledećoj tablici napravljeno je poređenje između tranzistora sa tačkastim spojem i vakuumskih cevi:

Vakuumska cev	Tranzistor sa tačkastim spojem
Katoda	Baza
Rešetka	Emitor
Anoda	Kolektor
Pojačavanje napona	Pojačavanje struje
$\mu = \Delta E_a / E_g$	$\alpha = I_c / I_e$
Visoka ulazna impedanca	Visoka izlazna impedanca
I_a	E_c
E_a	I_c
I_g	E_e
E_g	I_e
Snabdevanje stalnim naponom	Snabdevanje stalnom strujom
Kapacitivnost	Induktivnost
Velike dimenzije	Male dimenzije
Veliki utrošak snage	Mali utrošak snage
Osetljiva na udar	Izdržljiv
Obratni prednapon	Direktan prednapon

Površinski tranzistor već je poređen sa vakuumskom cevi. Ovo poređenje dato je na donjoj tablici.

Vakuumska cev

Katoda
Rešetka
Anoda
 $\mu = \Delta E_a / E_g$
Pojačavanje napona
Visoka ulazna
impedanca
(uzemljena katoda)
Niska izlazna
impedanca
Veliki utrošak snage
Lomljiva
Velika

Površinski tranzistor

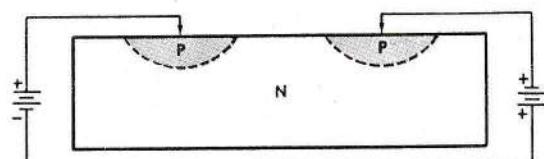
Emitor
Baza
Kolektor
 $\alpha = \Delta I_c / \Delta I_e$
Pojačavanje struje
Visoka ulazna
impedanca
(uzemljen emitor)
Niska izlazna
impedanca
Mali utrošak snage
Izdržljiv
Mali

PREDNAPONI

Kod vakuumske cevi rešetki se obično daje prednapon pomoću napona koji je u odnosu na katodu negativan. U slučaju tranzistora, kolektor može biti pozitivan ili negativan u odnosu na bazu a emitor može biti pozitivan ili negativan u odnosu na bazu. Slike 184, 185, 186 i 187 pokazuju razne polaritete prednapona za različite vrste tranzistora.

Polariteti prednapona zavise od toga da li je tranzistor površinske vrste N — P — N ili P — N — P, ili je sa tačkastim spojem vrste P ili N.

Kada se uzme da je tranzistor sa tačkastim spojem vrste N, u stvari tranzistor vrste P — N — P a tranzistor vrste P tranzistor vrste N — P — N, mogu se lako naći polariteti prednapona iz sledećeg jednostavnog pravila:



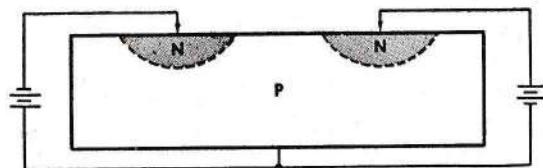
Sl. 184 — Tranzistor sa tačkastim spojem vrste N

»Emitoru svakog tranzistora daje se prednapon u direktnom pravcu u odnosu na bazu, a kolektoru u obratnom pravcu u odnosu na bazu«.

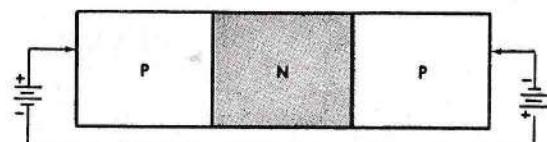
Iako su tranzistori razvijeni u poslednjih nekoliko godina, od njih se mnogo očekuje u neposrednoj budućnosti. Mnogi elektronski uređaji biće, korišćenjem tranzistora, oslobođeni ograničenja koja nastaju usled upotrebe vakuumske cevi — lomljivosti, glomaznosti, kratkovečnosti i zahteva za snabdevanje snagom.

Tranzistori su uspešno prilagođeni upotrebi u takvima uređajima kao što su gramofonski pojačavači, radio i televizijski prijemnici, pomagala za gluve, prenosni primopredajnici »vokitoki«, radarski uređaji za otkrivanje, računari, sistemi za telemerenje i u drugim uređajima koji koriste vakuumske cevi.

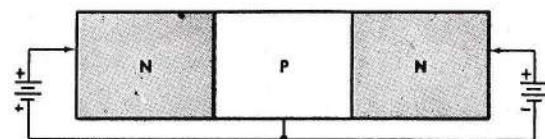
Naširoko se nastoji da se već savladaju sadašnja ograničenja tranzistora, kao što su neravnomernost u osobinama, visoki stepen šuma i osetljivost na topotu i vlažnost. Postoje svi razlozi da se veruje da će za kratko vreme sve ove teškoće biti savladane. Može se zato pretpostaviti da će tranzistori uskoro postati opšti sastavni delovi mnogih elektronskih uređaja na letelicama, naročito onih uređaja kod kojih su poželjni sastavni delovi manjih dimenzija.



Sl. 185 — Tranzistor sa tačkastim spojem vrste P



Sl. 186 — Površinski tranzistor P-N-P



Sl. 187 — Površinski tranzistor N-P-N

MODULACIJA NOSEĆIH TALASA

Modulacija je proces utiskivanja izvesnog obaveštenja nosećem talasu menjanjem njegove amplitude, učestanosti ili faze u skladu sa promenama govora ili signala koji se prenosi.

Noseći talas može biti jednosmerne struje ili naizmenične struje, ili niz ujednačenih impulsa koji se ponavljaju stalnom brzinom.

Nemodulisani noseći talas sam po sebi ne prenosi druga obaveštenja osim onog da predajnik radi.

Kada se učini da se neka karakteristika nosećeg talasa menja kao funkcija trenutne vrednosti modulišućeg signala, prijemnik može da otkrije promenu (demoduliše noseći talas) i da je prevede u razumljiv oblik.

Ako noseći signal ima oblik naizmenične struje ili talasa, njegova učestanost mora biti veća nego najveća učestanost u modulišućem signalu, da bi mogla da obuhvati sva obaveštenja ili promene koji postoje u signalu. Ako signal ima oblik lanca impulsa, brzina ponavljanja impulsa mora biti najmanje dvostruka vrednost najveće učestanosti u modulišućem signalu.

Učestanost modulišućeg signala nikada ne postoji sama u nosećem talasu, ali obaveštenja proizvedena putem modulacije izražena su u novim grupama radio-učestanosti (bočnih talasnih opsega) iznad i ispod nemodulisane noseće učestanosti, ili u promenama u vremenu, položaju ili širini impulsa u lancu impulsa. Ove promene u nosećem talasu nastaju u skladu sa trenutnim vrednostima modulišućeg signala. Više vrsta modulacije prikazano je na slici 188.

Načini modulacije mogu se grubo podeliti u pet opštih vrsta:

1. Amplitudna modulacija,
2. Frekventna modulacija,

3. Fazna modulacija,
4. Impulsna modulacija i
5. Doplerov princip.

AMPLITUDNA MODULACIJA

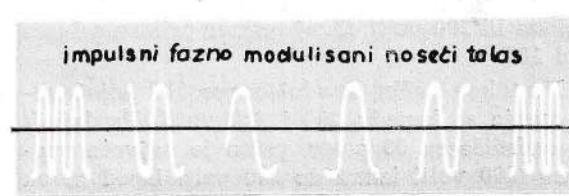
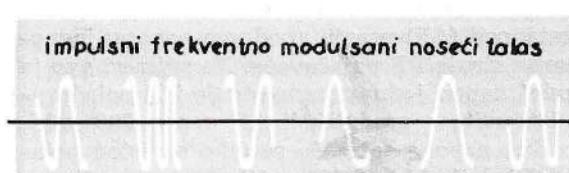
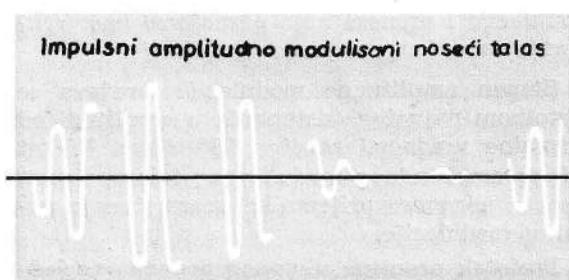
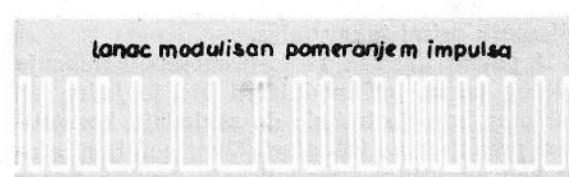
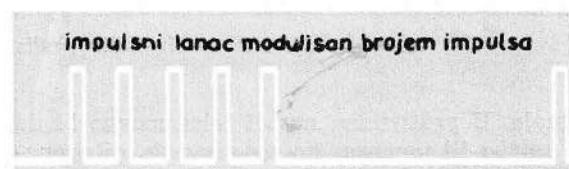
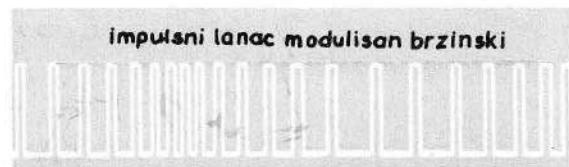
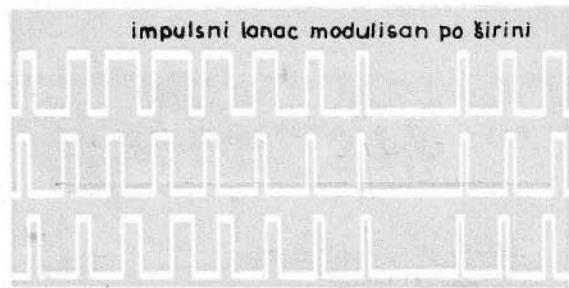
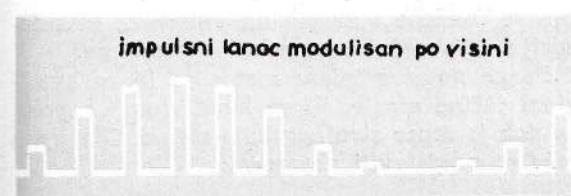
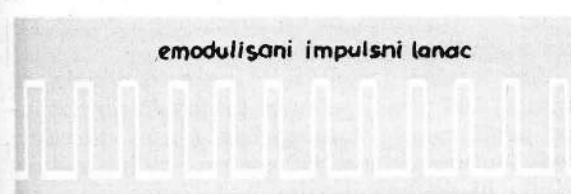
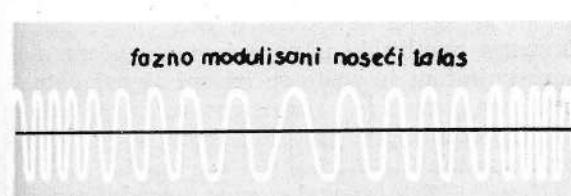
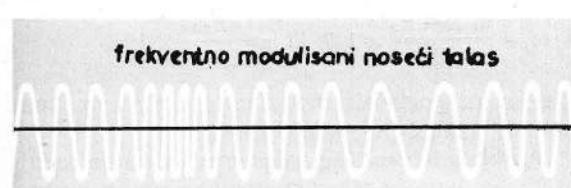
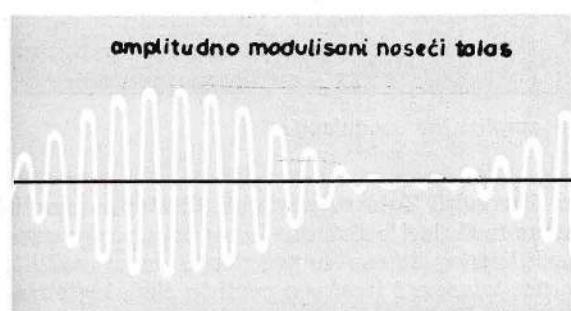
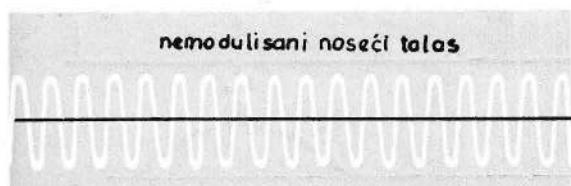
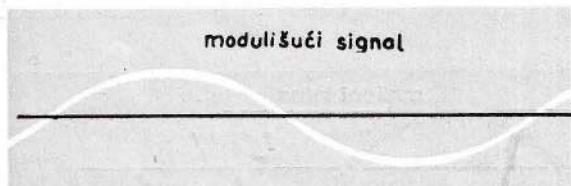
Amplitudna modulacija (AM) jeste promena snage izlaznog radio-frekventnog signala predajnika u ritmu zvučnog signala. Ovaj proces prikazan je na slici 189.

Energija radio-učestanosti nosećeg talasa povećava se ili smanjuje po snazi u skladu sa audionim (signalnim) učestanostima. Ako je audiona modulišuća učestanost visoka, radio-učestanost (noseći talas) mora se menjati po amplitudi brže nego kada bi audiona učestanost bila niska. Ako je audioni signal snažan, energija radio-učestanosti mora se povećavati ili smanjivati u većoj srazmeri nego da su signali slabiji. Stoga promene radio-učestanosti nosećeg talasa moraju odgovarati u svakom pogledu promenama audionih učestanosti, da bi se obezbedila vernost u prenošenju obaveštenja pomoću amplitudne modulacije nosećeg RF talasa.

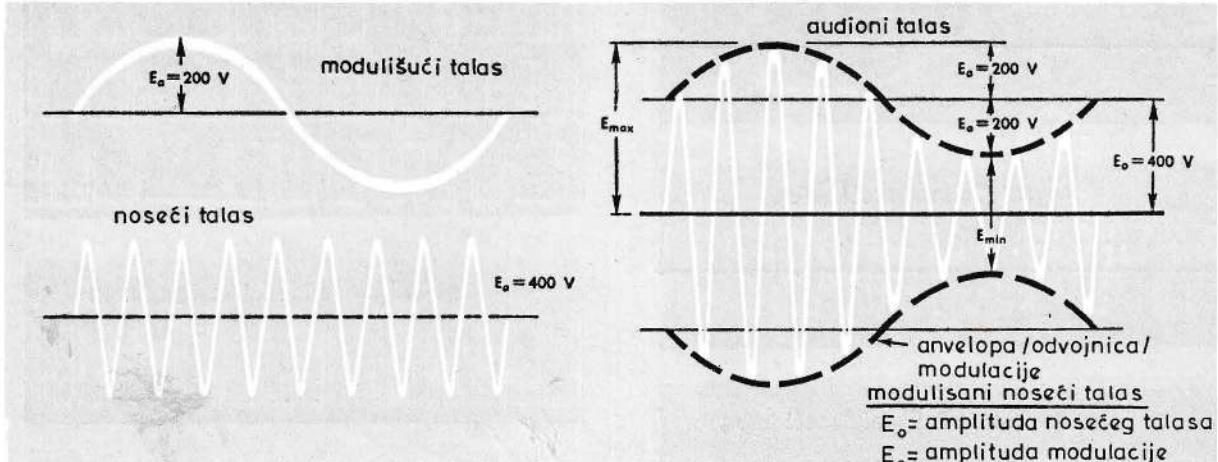
Pri analizi amplitudne modulacije uobičajeno je prepostaviti da je modulišući signal sinusoidalan po obliku, iako je on retko čist sinusoidalni talas.

Sam noseći RF talas mora biti slobodan od unutrašnjih promena u amplitudi koje bi mogle da nastanu usled slabo regulisanog napajanja snagom. On treba da bude, koliko je to moguće, što čistiji sinusoidalni talas.

Predajnik sa amplitudnom modulacijom treba da bude projektovan tako da na učestanost nosećeg talasa ne utiče uvođenje modulišućeg



Sl. 188 — Vrste modulacije



Sl. 189 — Grafičko predstavljanje amplitudne modulacije

signala. U protivnom, noseći talas mogao bi da se koleba ili pomera, što ne samo da bi prouzrokovalo interferenciju sa drugim kanalima, nego bi otežalo, ili čak onemogućilo, da jedan AM prijemnik primi takav talas.

U prvim danima radio-prenosa, *kolebanje* nosećeg talasa pri modulaciji bio je jedan od problema koje je trebalo da savladaju konstruktori predajnika i inženjeri. Ovaj neželjeni efekat kod amplitudno modulisanih nosećih talasa doveo je kasnije do razvoja dve druge vrste modulacije i prenosa koje poznajemo kao *frekventna modulacija* i *fazna modulacija*.

Stepen amplitudne modulacije izražava se postotkom najvećeg odstupanja u amplitudi od normalne vrednosti nosećeg RF talasa. Efekat jednog amplitudnog modulisanog talasa, meren pomoću odgovora prijemnika, srazmeran je postotku modulacije.

Postotak promene ukupnog napona poslednjeg stepena RF pojačavača kod jednog AM predajnika zavisi od odnosa napona audione učestanosti (AF) prema anodnom naponu jednosmerne struje RF pojačavača. Na primer, ako je anodni napon jednosmerne struje RF pojačavača 400 volti, a modulišući AF napon 200 volti, ova dva napona sabiraće se (ako su istog polariteta) i dati zbir od 600 volti. Ako su, pak, suprotni po polaritetu, oni daju razliku ova dva napona ili 200 volti. Ovaj primer prikazan je na slici 189.

Na takav način, anodni napon RF pojačavača menja se između 200 i 600 volti. Predajnik se moduliše za 50 posto, pošto je najveća promena (200 volti iznad do 200 volti ispod nivoa napona jednosmerne struje) 200/400 ili jedna polovina vrednosti napona jednosmerne struje

od 400 volti. Zato se postotak ili stepen amplitudne modulacije definiše kao postotak promene modulisanog talasa u poređenju sa nemodulisanim talasom i izražava pomoću sledećeg obrašca:

$$m = \frac{E_{\max} - E_o}{E} \times 100, \text{ ili } \frac{E_o - E_{\min}}{E_o} \times 100$$

gde je: m postotak modulacije i E_o amplituda nosećeg talasa (nemodulisanog).

Amplituda nosećeg talasa treba da se menja do što je moguće višeg stepena za svaku promenu signala, kako bi se proizveo najjači mogući izlazni signal iz detektora u AM prijemniku. Promena amplitude u najvećem mogućem stepenu potrebna je pošto se izlazni signal detektora menja upravo srazmerno sa amplitudom nosećeg talasa (pod pretpostavkom da je detektor linearan).

Noseći RF talas male snage, modulisan do visokog stepena, može da proizvede jači izlazni signal kod prijemnika od snažnijeg nosećeg talasa modulisanog do nižeg stepena.

Amplitudna modulacija ne sme nikada da premaši 100 posto, pošto bi to dovelo do potpunog poništavanja nosećeg talasa na vrhovima modulišućeg napona. Odsecanje ovih vrhova učinilo bi da noseći talas bude isprekidan, što znači da bi takav talas odsecao deo obaveštenja koja se prenose i mogao da proizvede interferenciju sa susednim prenosnim kanalima.

Snaga nosećeg talasa menja se ili sa kvadratom jačine struje, ili sa kvadratom napona sve dok je otpor strujnog kola stalan. Ova veza može se predstaviti obrascem:

$$P = \frac{E^2}{R} \text{ ili } P = I^2 R.$$

Stoga je trenutna vršna snaga jednog amplitudnog modulisanog nosećeg talasa, modulisanoj 100%, četiri puta veća od snage nemodulisanog nosećeg talasa, pošto je modulišući napon (ili struja) tada jednak naponu (ili struju) nosećeg talasa, a njihov zbir ravan dvostrukoj vrednosti napona (ili struje) nosećeg talasa. Ako se primeni obrazac za snagu:

$$P = \frac{E^2}{R} \text{ ili } P = I^2 R$$

i rešava po vrednosti snage pod uslovima, dobija se rezultat u obliku »4P« prema sledećem:

$$\frac{(2E)^2}{R} = 4P \text{ ili } (2I)^2 \times R = 4P$$

Za najveću snagu i vernošću prenosa signala, AM predajnik treba da bude sposoban za modulaciju do 100 posto, kao i da ima linearne karakteristike u celom opsegu modulacije. To znači da vršna snaga nosećeg talasa uvek treba da se menja sa kvadratom zbiru napona nosećeg talasa (ili struje) i modulišućeg napona (ili struje).

Amplitudno modulisani talas je kombinacija jednosmerne struje, osnovne noseće RF učestanosti, zbir i razlike učestanosti nosećeg talasa i modulišućeg signala plus njihovi harmonici. Na primer, ako je osnovna učestanost nosećeg talasa 500 kiloherca a audiona učestanost 10 kiloherca, talas sadrži sledeće osnovne učestanosti:

- a) Osnovnu noseću učestanost (f_o): 500 kiloherca,
- b) Drugi harmonik od f_o : 1000 kiloherca,
- c) Zbir f_o i f modulacije: 510 kiloherca i
- d) Razliku f_o i f modulacije: 490 kiloherca.

GORNI I DONJI BOČNI TALASNI OPSEZI AM

Anodno strujno kolo završnog RF pojačivača AM predajnika, govoreći uopšteno, podešeno je na osnovnu noseću RF učestanost i prenosi zbir i razliku učestanosti na antenu. Ali strujno kolo vrši diskriminaciju u odnosu na niže audione učestanosti i više harmonike učestanosti. Na takav način antena zrači talas sastavljen od tri učestanosti koje su bliske po vrednosti. Ove učestanosti su osnovna noseća učestanost i zbir i razlika učestanosti nosećeg talasa i modulišućeg signala. Zbir i razlika učestanosti nazivaju se gornji i donji bočni talasni opsezi.

Što je veća učestanost modulišućeg audionog signala, to će bočni talasni opsezi biti udaljeniji od nosećeg talasa. Ako je širina talasnog opsega predaje ograničena, učestanost modulišuće AF biće ograničena, kao što je to slučaj kod AM

radio-prenosa, gde je stanica ograničena na kanal od 10 kiloherca. Signal audione učestanosti od 5 kiloherca je najviša učestanost koja se može emitovati pomoću uobičajenih AM predajnika. Viša učestanost, naime, ne bi podržavala bočne talasne opsege u granicama kanala od 10 kiloherca. To znači, noseća učestanost više 5 kiloherca i manje 5 kiloherca predstavlja razliku od 10 kiloherca između bočnih talasnih opsega.

Postoji mogućnost da se emituju audione učestanosti do skoro 10 kiloherca, pomoću posebnih načina kao što je predaja pomoću jednostrukog bočnog talasnog opsega, ali se kod ovakvih sistema sreću izvesne teškoće. Ove teškoće su u opštem slučaju ograničile njihovu primenu u komercijalnoj radio-službi. Ukoliko se noseća učestanost ne povećava i smanjuje istovremeno i u obrnutoj srazmeri sa modulišućom učestanostu, modulisani noseći talas preklapa se sa susednim kanalima čim modulišuća učestanost premaši 5 kiloherca.

Ranije je već pomenuto da je nepoželjan efekat kolebanja koji se dešava pri amplitudnoj modulaciji doveo do razvoja drugih vrsta modulacija. Frekventna modulacija je jedna od tih razvijenih vrsta.

FREKVENTNA MODULACIJA

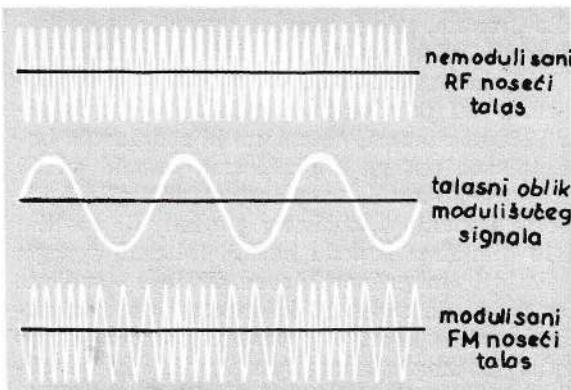
Frekventna modulacija je proces pomoću kog se prenosi obaveštenje putem promene učestanosti nosećeg RF talasa, u saglasnosti sa učestanostu modulišućeg signala.

Kod frekventne modulacije (FM), učestanost nosećeg RF talasa kada nije modulisana naziva se *srednjom učestanostu*, *normalnom učestanostu*, ili *učestanostu odmora* (f_r); poslednji izraz najčešće se koristi.

Kada se noseći talas moduliše uz pomoć jednog pozitivnog signalnog napona, njegova učestanost raste u srazmeri sa amplitudom pozitivnog signalnog napona, a kada se noseći talas moduliše pomoću jednog negativnog signalnog napona, njegova učestanost smanjuje se u srazmeri sa amplitudom negativnog signalnog napona.

Na slici 190 grafički je prikazana frekventna modulacija. Na slici se vidi jedan nemodulisani noseći talas, čiji svaki RF ciklus zauzima istu dužinu trajanja, jedan sinusoidalni modulišući signal i jedan modulisani noseći talas.

Najveća promena učestanosti od učestanosti odmora upravlja se prema amplitudi modulišućeg signala i naziva se *skretanjem*. Modulišući signal ne menja amplitudu nosećeg talasa, on pomera učestanost i koncentriše snagu u novim frekventnim bočnim talasnim opsezima.

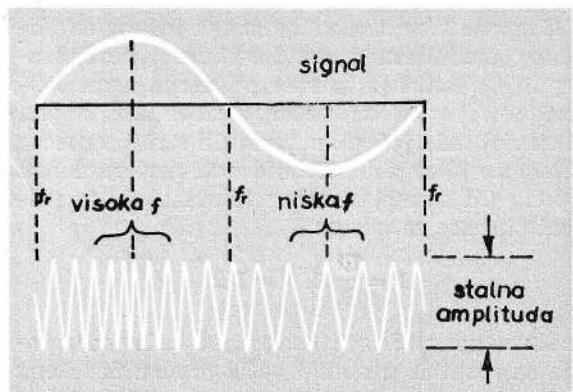


Sl. 190 — Grafički prikaz frekventne modulacije

STEPEN SKRETANJA SIGNALA

Sinusoidalni signalni napon izaziva kod FM predajnika zračenje signala koji se menja po učestanosti od učestanosti odmora nosećeg talasa na jednu višu učestanost, zatim natrag na učestanost odmora, potom na jednu nižu učestanost i nazad natrag na učestanost odmora u skladu sa učestanošću modulišućeg sinusoidalnog talasa. Ovaj proces, poznat kao *stepen skretanja* (devijacije), prikazan je na slici 191.

Strujno kolo FM predajnika koje je konstruisano da proizvodi skretanje od 40 kiloherca može da proizvede signale koji se razlikuju od učestanosti odmora za iznose znatno veće od 40 kiloherca. Strujno kolo može da postigne ovo zbog toga, jer osim normalnih gornjih i donjih bočnih talasnih opsega učestanosti koje proizvodi amplituda frekventne modulacije, postoje i drugi bočni talasni opsezi koji se razlikuju

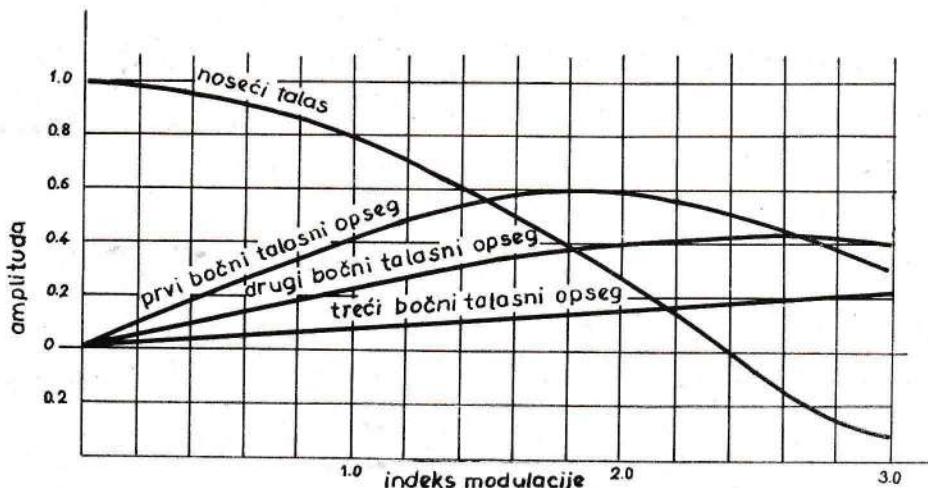


Sl. 191 — Noseći talas posle frekventne modulacije

od učestanosti odmora za višestruke umnoške modulišuće učestanosti.

Opseg ovih učestanosti postaje širi sa višim modulišućim učestanostima, kakve se traže za telefonske prenose pomoću nosećih talasa. Ova karakteristika zavisi od strujnog kola koje se koristi. Jačina predaje na učestanostima izvan normalnog skretanja, u opštem slučaju, ne smanjuje se na način koji je upravo srazmeran njihovom odvajjanju od učestanosti odmora. Zato jačina bočnih talasnih opsega, na učestanostima koje se znatno razlikuju od učestanosti odmora, može biti veća nego ona od učestanosti bliskih učestanosti najvećeg skretanja.

Ove učestanosti bočnih talasnih opsega mogu da prouzrokuju interferenciju na drugim radio-kanalima koji se mogu znatno razlikovati po učestanosti od predajnika koji izaziva interferenciju. Ova interferencija može najlakše nastati kod predajnika koji koriste vrlo visoke indeksne modulacije.



Sl. 192 — Promena jačine signala sa indeksom modulacije

INDEKS MODULACIJE

Indeks modulacije jednog FM prenosa može se porebiti sa procentom modulacije koji se primenjuje na amplitudno modulisane signale, mada je indeks sasvim drugčijeg karaktera. Indeks modulacije često se definiše kao »odnos skretanja noseće učestanosti prema učestanosti modulišućeg signala«. On se može izraziti jednačinom:

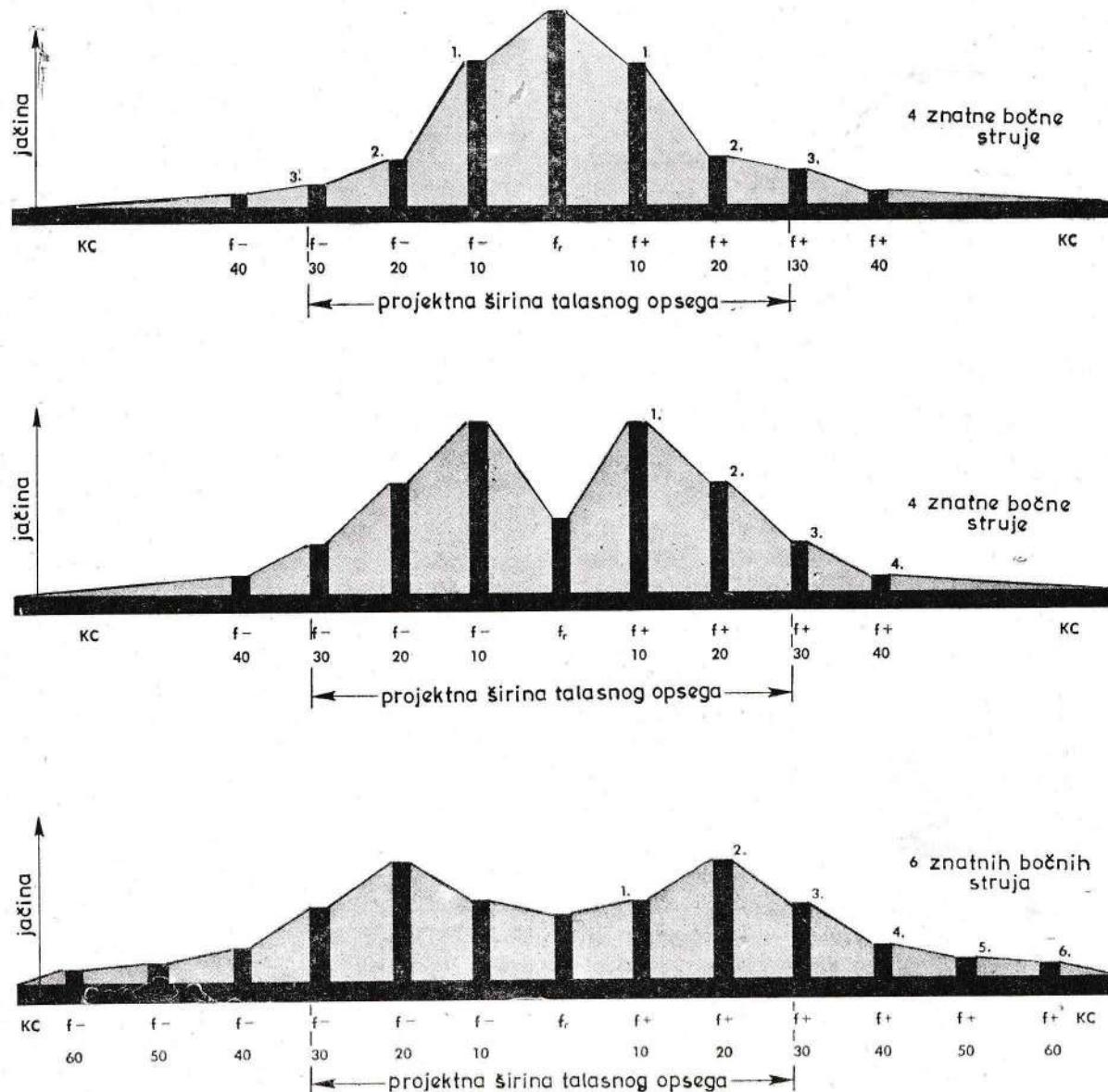
$$\beta = \frac{\text{skretanje učestanosti nosećeg RF talasa}}{\text{učestanost modulišuće audione učestanosti}}$$

gde je β indeks modulacije.

Granični indeks modulacije je odnos skretanja koji predstavlja odnos između najvećeg skretanja noseće učestanosti i najviše modulišuće učestanosti koja se koristi.

Dok je kod amplitudne modulacije intenzitet nosećeg talasa stalan, a menja se samo amplituda bočnih učestanosti, kod frekventne modulacije amplitude nosećeg talasa menja se sa indeksom modulacije, kako je to prikazano na slici 191.

Pri indeksu modulacije od približno 2,4 noseći talas nestaje u potpunosti. On tada menja fazu u odnosu na svoju fazu bez modulacije,



Sl. 193 — Spektar raspodele amplituda u zavisnosti od indeksa modulacije

postajući na takav način negativan. On ostaje negativan sve dok se indeks modulacije ne poveća na približno 4,6, na kojoj tački on ponovo prolazi kroz nulu, obrće fazu i ponovo postaje pozitivan.

Kada bi se krive prikazane na prethodnom dijagramu produžile do većih indeksa modulacije, razvili bi se novi bočni talasni opsezi, pa bi noseći talas nastavio da prolazi kroz periodične promene u fazi. On bi nastavio da prolazi kroz nulte tačke pri odgovarajućim indeksima modulacije. Matematička rešenja za ovo ponašanje suviše su složena da bi ovde bila izlagana, ali se ona mogu predstaviti ako se razmotri izvestan broj sinusoidalnih talasa različitih učestanosti koji se sabiraju ili oduzimaju na izvensnim tačkama da bi se poništila ili obrtala fazu odnosnog talasa.

Kod frekventne modulacije i fazne modulacije (PM) o kojoj se dalje govori, energija koja odlazi kroz bočne talasne opsege oduzima se od nosećeg talasa. Međutim, ukupna snaga u nosećem talasu i njegovim bočnim talasnim opsezima ostaje ista, bez obzira na indeks modulacije. Pri određenoj vrednosti indeksa modulacije može biti više snage u prvom bočnom talasu nego i u jednom drugom bočnom talasnom opsegu. Najveći deo snage može da bude u drugom i trećem bočnom talasnom opsegu, pri nekim drugim vrednostima indeksa modulacije.

I FM i PM sistemi poseduju prednost da su srazmerno van uticaja interferencije smetnji atmosferskog ili ljudskog porekla koje imaju inače u suštini promenljive amplitudu. No i FM i PM zračenja su po svom karakteru manje ili više slična svetlosnim zracima, zato što se koriste visokim nosećim učestanostima.

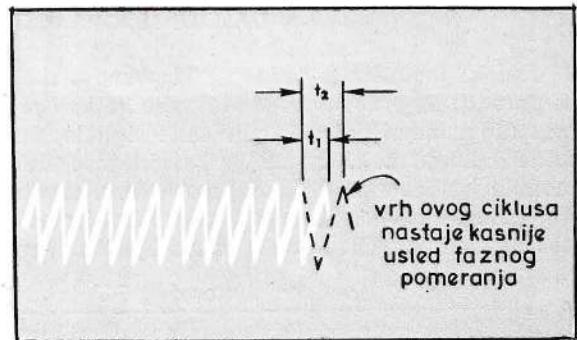
FM se uopšte više koristi nego PM, pošto je u stanju da nosi više obaveštenja (da proizvede više promena učestanosti) u jednom kanalu sa svim specifičnim ograničenjima učestanosti.

I za FM i za PM može se koristiti isti prijemnik, pošto diskriminator ili detektor učestanosti odgovara na promene u fazi na isti način na koji odgovara i na promene u učestanosti.

FAZNA MODULACIJA

Fazna modulacija je indirektan način da se dobije frekventno modulisani noseći talas. Ona se postiže propuštanjem FM i AM signala kroz različite mreže za pronalaženje faze koje teže da promene fazu napona radio-frekventnog nosećeg talasa naizmenične struje.

Tako se faza periode nosećeg talasa pomera u odnosu na svaki prethodni period i sledeći period je ili ispred ili iza svoje normalne faze.



Sl. 194 — Fazna modulacija nosećeg talasa

Drugim rečima, period nosećeg talasa dostiže svoju vršnu vrednost ili ranije ili kasnije nego što to čini kod nemodulisanog nosećeg talasa. Ova pojava prikazana je na slici 194, na kojoj je normalna perioda predstavljena kao t_1 a duža perioda kao t_2 . Duža perioda odgovara nižoj učestanosti pošto je:

$$f = \frac{1}{t}$$

Teorijski, jedina razlika između frekventno modulisanih talasa proizvedenih pomoću PM i FM sistema sastoji se u faznoj povezanosti između modulišućeg signala i skretanja. Ali praktično postoje i druge razlike. Jedna razlika potiče iz činjenice da je sa faznom modulacijom noseća učestanost stabilnija nego sa frekventnom modulacijom. U fazno modulisanom sistemu učestanost je mnogo stabilnija, pošto se oscilator može kontrolisati pomoću kristala i modulišuće učestanosti koja se primenjuje u nekom kasnjem stepenu. Kod FM sistema modulišući signal mora se primeniti neposredno na oscilatorno kolo. Pošto je oscilator konstruisan da bude rezonantan na učestanosti mirovanja, on daje drukčiju impedancu učestanostima iznad ili ispod učestanosti odmora. Stoga se njegov izlazni napon menja nešto u amplitudi pri učestanostima različitim od učestanosti odmora.

Druga osnovna razlika između FM i PM sastoji se u tome što je u FM sistemu skretanje određeno samo amplitudom modulišućeg signala, a kod PM sistema skretanja je srazmerno i učestanosti i amplitudi modulišućeg signala.

IMPULSNA MODULACIJA

Sve veći zahtevi za telekomunikacionim sredstvima, kako u vojnoj, tako i u civilnoj primeni, doveli su do razvoja novih vrsta radio-sistema i radarskih sistema, što je učinilo nu-

žnim nove načine modulacije za prenos obaveštenja različitih i složenih po obliku. *Impulsna modulacija* sa svojim mnogim mogućim promenama pokazala se najpraktičnijom za mnoge primene.

U osnovi, impulsna modulacija razlikuje se od drugih vrsta modulacije po tome, što se obaveštenje koje treba preneti uzima u kratkim, povremenim intervalima, pa se ovi signali uzimaju za modulisanje nosećeg talasa. Noseći talas menja se na neki od načina koji je u skladu sa trenutnom vrednošću modulišućeg signala u trenutku njegovog uzimanja. Noseći talas sastoji se od lanca impulsa koji su jednaki po prirodi i generisani jednom stalnom brzinom. Noseći talas moduliše se pomoću impulsnog lanca iz uzetih podataka koji služe kao noseći podtalas.

Impulsna modulacija primenjuje se tamo gde se zahteva umnožavanje ili jednovremeno prenošenje više od jednog signala podataka na zajedničkom nosećem talasu, kao što je slučaj kod telemetriskih, žičanih ili mikrotalasnih televizijskih kablova, okeanskih kablova i drugih. Impulsna modulacija omogućava da se prenose mnoge vrste podataka u kratkim periodima vremena i sa minimalnom opremom.

Jednovremeni prenos mnogostruktih kanala obavlja se pomoću jednog od dva sistema. Jedan sistem sastoji se u korišćenju posebne noseće podučestanosti za svaki kanal, a drugi obuhvata prenos signala podataka uzetih iz svakog kanala u određenom vremenskom redosledu.

U prvom sistemu, poznatom kao *podela učestanosti*, svaki signal podataka moduliše noseći podtalas koji je određen za svoj specifični kanal i razlikuje se učestanošću nosećeg podtalasa. Kod drugog sistema, poznatog kao *umnožavanje vremenskom podelom*, trenutna amplituda signala uzima se iz jednog kanala u određenom trenutku i prenosi po određenom redosledu sve dok se uzimaju podaci iz kanala. Proces se zatim ponavlja istim redosledom sve dok se ne prenesu svi željeni podaci.

Priroda podataka koje treba preneti određuje širinu talasnog opsega koju zahteva prenošenje i učestanost uzimanja podataka. Za prenošenje glasa brzina uzimanja podataka mora biti dovoljno velika da slušaoci ne bi primetili intervale između novih podataka koji se prenose. Brzina uzimanja podataka od približno 8000 uzimanja u sekundi dovoljna je da se kod slušalaca proizvede efekat normalnog neprekidnog zvuka.

Pošto se samo jedna trenutna vrednost modulišućeg signala prenosi kroz jedan kanal u svakom datom trenutku, u sistemu za umnožava-

vanje vremenskom podelom nema preslušavanja ili međukanalske modulacije. Ova međukanalska modulacija može da nastane u sistemu sa podelom učestanosti — zbog nelinearnog frekventnog odgovora pojačavača za modulaciju.

Impulsna modulacija, sama po sebi, vrlo je pogodna za umnožavanje pomoću sistema sa vremenskom podelom, pošto mora da se služi trenutnim uzimanjem podataka. Kada se impulsna modulacija kombinuje sa vremenskom podelom, sistem se naziva *impulsno-vremenskim* multipleksom i raspolaže mnogim odlikama poželjnim za sistem za vezu koji obrađuje složene podatke. Neke od ovih odlika su:

a) Veliki odnos signal/šum, što je omogućeno upotrebom strujnih kola za ograničenje i odsecanje;

b) Priroda uključivanja i isključivanja impulsne modulacije čini mogućim da se takve modulacije prilagodavaju jedinstvenim sistemima za ponavljanje — da bi se povećao domet prenosa;

c) Nisu više potrebna složena strujna kola za filtriranje;

d) Prilagodljivost i elastičnost primene;

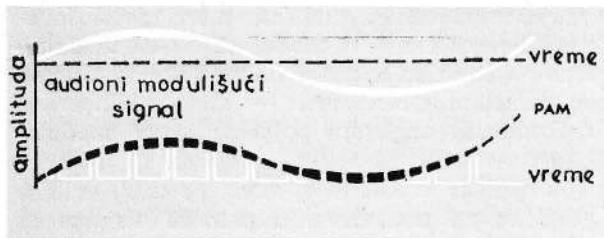
e) Nema interferencije usled međukanalske unakrsne modulacije.

Impulsi imaju individualne karakteristike (parametre) u pogledu visine, širine, trajanja, brzine ponavljanja, vremena formiranja, vremena gubljenja, oblika i odstupanja od normalnog nastajanja. Ove odlike mogu se koristiti pojedinačno ili u kombinacijama, u svrhu dobijanja mnogih različitih načina impulsne modulacije, prilagođenih za prenošenje obaveštenja različitih po obliku i po stepenu složenosti.

U čistoj impulsnoj modulaciji i brzina i vreme uzimanja signala ostaju stalni, bez obzira na to kako se impulsi u lancu modulišu.

Kada se impulsno mobilisani sistem upotrebljava za prenošenje obaveštenja iz više izvora, ili za prenošenje podataka vrlo različite prirode, odnos šuma prema signalu može postati preteran (što važi za sisteme koji se koriste uobičajenim načinima modulacije). Odnos signal/šum može se poboljšati upotrebom strujnih kola za odsecanje i ograničavanje, a takođe povećavanjem širine talasnog opsega — ako je to moguće — da bi se dobio veći razmak između pojedinih kanala za prenošenje podataka. Širina prenosnog talasnog opsega zavisi od oblika impulsa, kao i brzine njegovog ponavljanja, i od načina i stepena modulacije.

Činjenica da se u impulsnoj modulaciji energija prenosi samo u kratkim razmacima, omogućuje korišćenje visokih vršnih snaga nosećeg



Sl. 195 — Amplitudnoimpulsna modulacija

talasa i upotrebu magnetrona i klistrona za generisanje nosećih talasa vrlo velike učestanosti.

Kada se upotrebljavaju noseći talasi visoke učestanosti, širina talasnog opsega je mnogo veća i postoji više kanala za prenošenje podataka. Uobičajeno je da se noseći talas prekine između impulsa za modulaciju, ali je to nepotrebno, osim ako se želi da se postigne mala ušteda utroška snage.

Sada ćemo objasniti više vrsta impulsne modulacije, uzimajući kao prvu amplitudnoimpulsnu modulaciju.

AMPLITUDNOIMPULSNA MODULACIJA

Kada se vrši modulacija amplitude impulsa, prenos se naziva amplitudnoimpulsnom modulacijom (AIM). Iako ga je lako primenjivati, ovaj način se ne upotrebljava mnogo pošto zahteva opremu sa linearnim karakteristikama. Isto tako, on može da radi samo sa prosečno 50 posto svojih maksimalnih mogućnosti. Slika 195 prikazuje lanac impulsa sa amplitudnoimpulsnom modulacijom.

U sistemima AIM upotrebljava se jedna od dve vrste amplitudne modulacije. Jedna od njih poznata je kao jednosmerna AIM. Ova vrsta koristi se impulsima jednog polariteta. Druga vrsta poznata je kao dvosmerna AIM, usled toga što se koristi impulsima koji se menjaju po amplitudi iznad i ispod jednog utvrđenog referentnog nivoa. Impulsi su pozitivni i nega-

tivni u amplitudi, a srednja vrednost im je jednak nuli. Slika 196 pokazuje dve vrste amplitudnoimpulsne modulacije.

MODULACIJA IMPULSA PO ŠIRINI

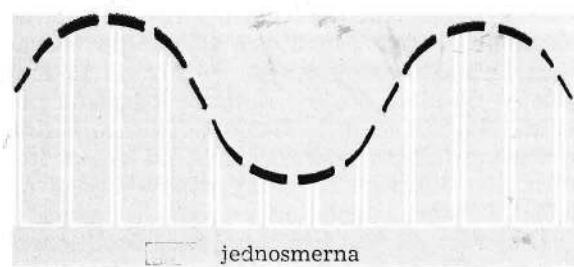
Modulacija impulsa po širini (PWM) dešava se kada se širina ili trajanje impulsa menja simetrično, u skladu sa modulišućim signalom, ili kada se modulišu napadna ili izlazna ivica impulsa. Modulacija impulsa po širini se obično koristi za modulisanje ili demodulisanje u drugim načinima impulsne modulacije. Ako se PWM diferencira, ili joj se da *kapija*, dobija se *modulacija pomeranjem impulsa*. Kada se lanac impulsa, modulisan po širini, propušta kroz niskopropusni filter, signal se potpuno uklanja.

Modulacija impulsa po širini predstavlja pogodno sredstvo za prenošenje obaveštenja, ali obuhvata promenu radnog ciklusa, što smanjuje operativnu efikasnost opreme. Jedna kombinacija modulacije impulsa po širini i brzinske modulacije impulsa mogla bi se koristiti za održavanje stalnog radnog ciklusa. Ciklus se održava stalnim automatskim smanjivanjem brzine širokih impulsa, a povećavanjem brzine uzanih impulsa u obrnutoj srazmeri sa širinom impulsa.

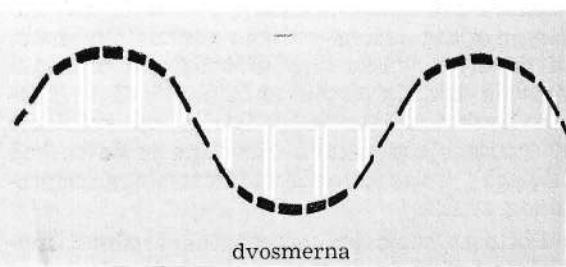
Radni ciklus jeste odnos dužine (trajanja) impulsa i perioda ponavljanja impulsa. Da bi se vršna snaga pretvorila u prosečnu snagu, vršna snaga množi se radnim ciklusom. Ovi pojmovi prikazani su na slikama 197, 198, 199 i 200.

Kod modulacije širinom impulsa promena prosečne snage nosećeg talasa približno je ista kao kod amplitudnoimpulsne modulacije, ali amplituda impulsa ostaje stalna. Stalna amplituda impulsa olakšava ograničavanje i odsecaњe impulsa da bi se otklonili spoljni šumovi, kao što je to prikazano na slikama.

Brzinska modulacija impulsa je takođe podložna promenama radnog ciklusa i gubitku u prosečnoj snazi za vreme modulišćeg ciklusa. Zbog ovog nedostatka ona se obično ne upotrebljava.

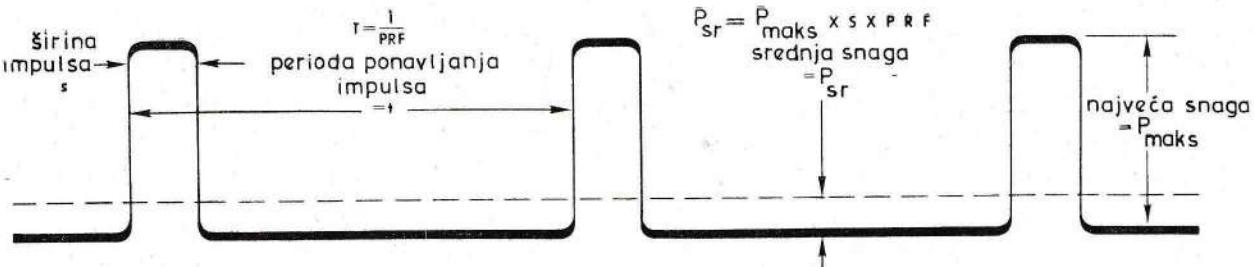


jednosmerna



dvosmerna

Sl. 196 — Vrste amplitudnoimpulsne modulacije



Sl. 197 — Definicija karakteristika impulsa

MODULACIJA POMERANJEM IMPULSA

Modulacija pomeranjem impulsa, nazvana tako *vremenska impulsna modulacija* i *položajna impulsna modulacija*, uveliko se koristi u mikrotalasnim multipleksima sa vremenskom podelom pošto dozvoljava da se više impulsnih lanaca preplete bez zbrke. I druge vrste impulsne modulacije pružaju slične mogućnosti ako se ograniči opseg modulacije.

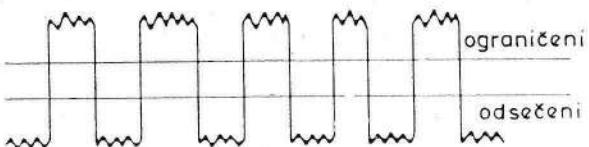
Modulacija pomeranjem impulsa (PDM) vrši se promenom vremenskog razmaka između impulsa, ili menjanjem odstojanja signalnih impulsa u odnosu na jedan *impuls za označavanje*. Impuls za označavanje dobija se iz zasebnog generatora za označavanje, kao što je multivibrator sa slobodnim hodom. Generator za označavanje moduliše noseći talas u podjednakim intervalima pomoću impulsa stalne širine i amplitude, ili pomoću parova impulsa koji se jasno razlikuje od onih koje proizvodi signal.

Postoji više načina pomoću kojih se signali audione učestanosti mogu upotrebljavati za proizvođenje modulacije pomeranjem impulsa. Jedan način koristi se pokretnim bloking — oscilatorom. Bloking — oscilator provodi kada se pozitivni deo audionog signala naponu dovodi na njegovu kontrolnu rešetku, ili kada se negativni deo audionog signala dovodi na njegovu katodu.

Pozitivni i negativni delovi audionog signala dovode se jedan za drugim na rešetku i katodu jednog jedinog bloking — oscilatora preko strujnih kola za ograničavanje ili vezivanje. Mogu se koristiti i dva bloking — oscilatora sa odgovarajućim prednaponom. Prvom je dat prednapon tako da provodi samo pozitivni deo audionog signala; drugom se daje prednapon da provodi samo negativni deo. U svakom slučaju, krajnji rezultat je isti. Bloking — oscilator provodi i proizvodi modulišući impuls kada amplituda ulaznog signala dostigne unapred određenu pozitivnu ili negativnu vrednost. Učestanost audionog signala u ovom slučaju određuje učestanost kojom su generirani modulišući impulsi.



Sl. 198 — Originalni niz impulsa širini



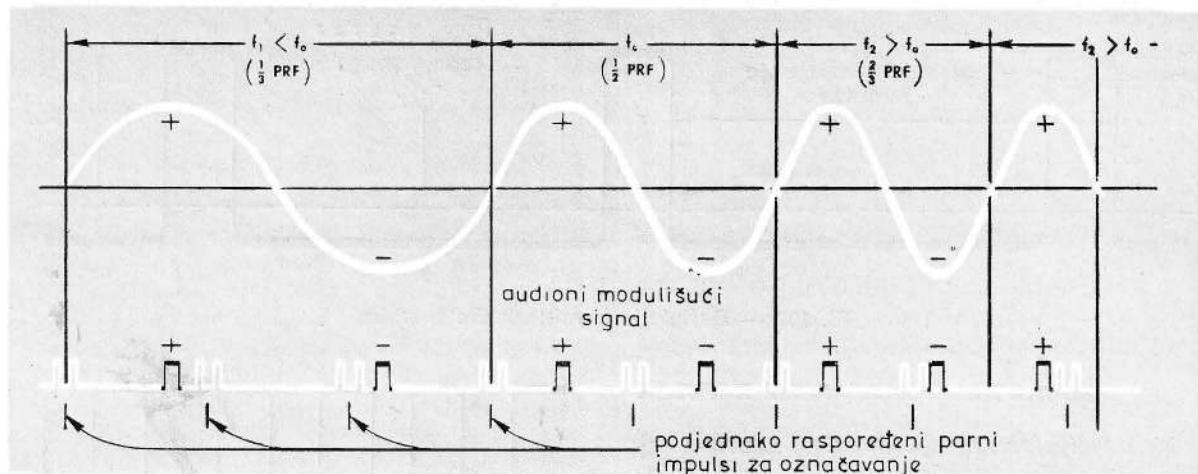
Sl. 199 — Impuls sa šumovima



Sl. 200 — Pojačani izlazni napon posle ograničavanja i odsecanja

Kada se ovi impulsi superponiraju, ili se koriste za okidanje kod lanca nosećih impulsa koji se modulišu u jednakim intervalima pomoću jednog *impulsa za obeležavanje*, položaj signalnih impulsa menja se u odnosu na impulse za obeležavanje u skladu sa promenama učestanosti signala. Tako je obaveštenje predato pomoću signala predstavljeno relativnim položajem signalnih impulsa i impulsa za obeležavanje, kao što je prikazano na slici 201. Na toj slici audioni modulišući signal predstavljen je pomoću tri sinusoidalna talasa sa različitim učestanostima.

Da bi prikazivanje bilo očiglednije, učestanost srednjeg sinusoidalnog talasa predstavljena je kao da je jednaka polovini učestanosti ponavljanja impulsa (PRF) *parnih impulsa za obeležavanje*. Na takav način svaka polovina audionih perioda proizvodi jedan impuls koji se nalazi tačno na pola puta između susednih parnih impulsa za obeležavanje. Dva signalna impulsa udaljena su jedan od drugog koliko i impulsi za obeležavanje.



Sl. 201 — Primer modulacije pomeranjem impulsa

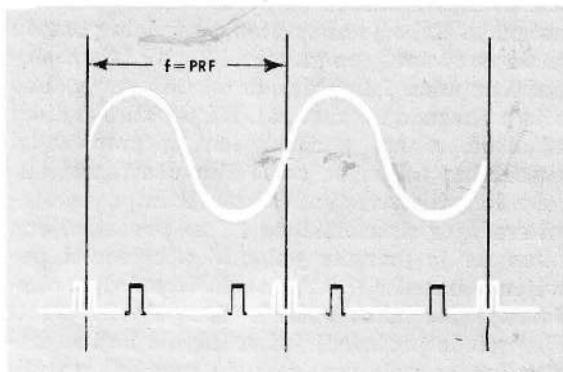
Prvi sinusoidalni talas predstavlja jedan signal s nižom učestanostu (jednom trećinom PRF signala za obeležavanje — u ovom primeru) i rastojanje između signalnih impulsa je na odgovarajući način veće. Nikakav signalni impuls ne pojavljuje se između jednog para impulsa za obeležavanje. Treći i četvrti sinusoidalni talas predstavljaju jedan signal veće učestanosti (dve trećine PRF signala za obeležavanje, kako je prikazano). Odstojanje između signalnih impulsa srazmerno je manje, pri čemu se dva signalna impulsa pojavljuju između jednog para signala za obeležavanje, naizmenice sa jednim signalnim impulsom koji se pojavljuje između drugog para signala za obeležavanje. Drugim rečima, u razmaku od dva signala za obeležavanje pojavljuju se tri signalna impulsa.

Kada bi audioni signal imao istu učestanost kao PRF signal za obeležavanje, pojavila bi se po dva signalna impulsa, po jedan za svaku polovinu audionog perioda, između svakog sledećeg para signala za obeležavanje, kao što je to prikazano na slici 202.

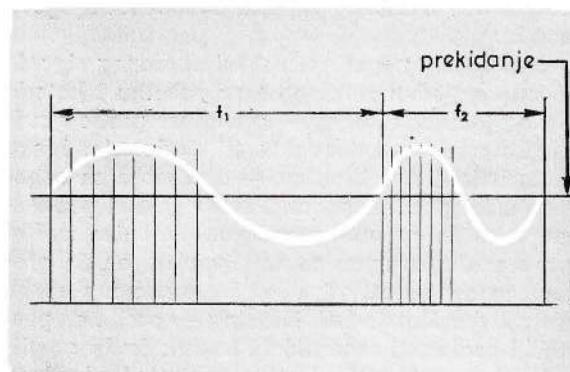
Modulacija pomeranjem impulsa može se takođe ograničiti i odsecati da bi se smanjio šum, ali ona daje manju srednju izlaznu snagu nosećeg talasa nego modulacija impulsa po širini za istu vršnu snagu.

IMPULSNA FREKVENTNA MODULACIJA

Impulsna frekventna modulacija (PFM) je sistem u kojem se učestanost nosećih impulsa menja u skladu sa promenama amplitude ili učestanosti, odnosno u skladu sa obe te promene — ako je reč o modulišućem signalu. Srednja snaga nosećeg talasa, kako za modulaciju pomeranjem impulsa, tako i za impulsnu



Sl. 202 — Modulacija pomeranjem impulsa koja nastaje kada je učestanost modulišućeg signala jednaka PRF parnih impulsu za označavanje



Sl. 203 — Impulsna frekventna modulacija pomoću audionih signala f_1 i f_2 pri $f_2 = 2f$

frekventnu modulaciju zadovoljavajuće je stalna.

Impulsna frekventna modulacija vrlo je slična modulaciji pomeranjem impulsa, samo što se ne upotrebljavaju posebni impulsi za obeležavanje, a promene audionih signala koriste se za proizvođenje odgovarajućih promena u PRF kod nosećih impulsa. Razvoj *frekventno modulisanih magnetrona* učinio je sistem impulsne frekventne modulacije praktičnim za mnoge primene koje zahtevaju prenošenje složenih podataka, pri čemu signal može znatno da se menja po učestanosti ili amplitudi u kratkim vremenskim intervalima.

Princip impulsne frekventne modulacije prikazan je na slici 203. Samo pozitivni deo audionog signala koristi se za proizvođenje modulacije koja je data u obliku grupa impulsa. Učestanost impulsa sadržanih u jednoj grupi menja se u saglasnosti sa učestanošću audionog signala.

U ovom primeru samo pozitivna polovina svakog audionog ciklusa koristi se za proizvođenje modulisanih impulsnih grupa. Ovaj postupak vrši se na takav način da se grupe radi lakšeg predstavljanja i dešifrovanja, mogu odvajati nemodulisanim intervalima.

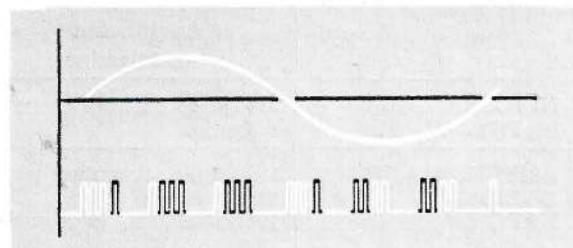
Gornja vrsta impulsne frekventne modulacije vrši se primenjivanjem audionog signala na modulator multivibratorske vrste, ili na magnetronsko oscilatorno strujno kolo. U drugom slučaju koristi se magnetronska modulacija vrste FM — CW. Modulacija se vrši na takav način što se jačina polja magnetrona (pa sledstveno tome i njegova učestanost) menja u skladu sa promenom učestanosti audionog signala.

Modulatori multivibratorske vrste sada se najčešće upotrebljavaju u sistemima sa impulsnom frekventnom modulacijom, ali se zamenjuju magnetronima FM — CW kad god je to moguće, pošto su ovi magnetroni pouzdaniji u radu i daju izlazni napon sa mnogo većim odnosom signala prema šumu.

IMPULSNA MODULACIJA POMOĆU BROJA IMPULSA

Mogu se koristiti i promene modulišućeg signala da bi se proizvele grupe impulsa promenljive po broju i koncentraciji u odnosu na jedan normalni grupni broj bez modulacije. Ovaj postupak naziva se modulacijom pomoću broja impulsa (PCM).

Modulacija pomoću broja impulsa proizvodi se korišćenjem signalnog napona za promenu prednapona jednog strujnog kola za davanje ključa koji u svom normalnom nemodulisanom



Sl. 204 — Impulsna modulacija pomoću broja impulsa

radu (rad bez signala) proizvodi grupe impulsa. Impulsi su jednaki po broju i koncentraciji. Strujno kolo za davanje ključa može da sadrži jedno-udarni multivibrator.

Strujno kolo za davanje ključa konstruisano je tako da će pozitivni signalni napon povećavati broj i/ili koncentraciju impulsa u normalnoj grupi. Takođe, jedan negativni signalni napon smanjivaće broj i/ili koncentraciju impulsa u srazmeri sa promenama u amplitudi ili u učestanosti i audionog signala ili u srazmeri sa obe te promene.

Princip PCM prikazan je na slici 204.

Impulsna modulacija pomoću broja impulsa je sasvim slična impulsnoj frekventnoj modulaciji, izuzev što se u PCM sistemu ne menja učestanost nosećeg talasa. Takođe, u PCM sistemu obaveštenja se predaju brojem impulsa sadržanih u svakoj *signalno modulisanoj grupi*, za razliku od broja impulsa u *normalnoj grupi*.

ZAKLJUČCI O IMPULSNOJ MODULACIJI

Neke vrste modulacije, kao što je impulsna amplitudna modulacija, mogu se detektovati uobičajenim strujnim kolima koja se koriste kristalnodiodnim integratorima i detektorima. Ali složenije vrste, kao što je ona sa pomeranjem impulsa, promenom širine impulsa i modulacijom pomoću broja impulsa, zahtevaju naročita sinhronizujuća i dešifrujuća strujna kola. Ova strujna kola sadrže stepene za korišćenje i podudaranje, integratore, diskriminatore za širinu impulsa i PRF, osim kristalnodiodnih integratora i detektora. Strujna kola i principi rada ovih posebnih uređaja razmotreni su u pojedinostima doncije u sklopu »Sistema za šifrovanje i dešifrovanje«.

Kao mešači i detektori, kristalne diode zamenile su vakuumске cevi u mnogim UKT strujnim kolima, zbog toga što im je vreme prolaska zanemarljivo i što imaju bolji izlazni odnos signal/šum.

	Amplitudna modulacija	Frekventna modulacija	Modulacija pomeranjem impulsa
NIVO SIGNALA IZ PREDAJNIKA	Menja se sa nivoom modulacije.	Ostaje stalan za vreme modulacije.	Ostaje stalan za vreme impulsa.
AMPLITUĐA MODULIŠUĆEG NAPONA	Određuje trenutnu promenu nivoa signala. Što je signal jači, to je veća trenutna promena nivoa nosećeg talasa.	Određuje trenutno odstupanje učestanosti od noseće učestanosti. Što je jači audioni signal, to je jače skretanje učestanosti nosećeg talasa.	Određuje trenutno odstupanje u vremenu kanalskog impulsa od položaja odmora. Što je jači audioni signal to je veće odstupanje u vremenu.
UČESTANOST MODULIŠUĆEG NAPONA	Određuje brzinu promene amplitude RF talasa.	Određuje brzinu kojom se menja učestanost nosećeg talasa između visoke i niske vrednosti.	Određuje broj uzimanja podataka koji se prenose u svakom periodu modulišućeg napona.
BOĆNI TALASNI OPSEZI KOJI SE PRENOSE	Širina bočnih talasa opsega koji se prenose određena je učestanošću modulišućeg napona. Sadašnja opšta granica je 5 kHz sa svake strane nosećeg talasa.	Širina bočnih talasnih opsegova koji se prenose određena je amplitudom modulišućeg napona. Sadašnje granice kod vojnih uredaja su 40 kHz sa svake strane učestanosti odmora. Povrh toga, obezbeđuje se i zaštitni talasni opseg od 20 kHz, radi odvajanja susednih kanala, podeljen podjednako na obe strane učestanosti odmora.	Širina talasnog opsega koji se prenosi određena je širinom impulsa koji se prenose. Širina talasnog opsega je višestruka u odnosu na onu koju zateva AM ili FM. Širina talasnog opsega za prenošenje iste količine obaveštenja može se približno dati obrascem: širina talasnog opsega u mHz dužini impulsa u mikrosekundama.
SNAGA MODULATORA	Jedna polovina ulazne anodne snage ka modulisanim stepenu.	Može se zanemariti jer ne dovodi do gubitaka snage u anodi kod modulatorske cevi.	Može se zanemariti jer ne dovodi do gubitaka snage u anodi kod modulatorske cevi.
SNAGA NOSEĆEG TALASA	Završni pojačavač mora biti u stanju da pruži četverostruku nominalnu snagu nosećeg talasa kod 100% modulacionih vrhova.	Završni pojačavač mora biti u stanju da pruži samo nominalnu snagu nosećeg talasa.	Završni pojačavač mora biti u stanju da pruži samo nominalnu snagu nosećeg talasa.
OGRANIČENJA U UČESTANOSTI	Nikakva	Normalno iznad 20 mHz, obično 2 mHz.	Iznad 1000 mHz.
MODULIŠUĆI SIGNALI	Neprekidni	Neprekidni	Periodični

Kod običnih diodnih vakuumskih cevi fizički prostor između katode i anode veliki je u poređenju sa talasnom dužinom UKT nosećeg talasa i vreme koje je potrebno da elektroni pređu sa katode na anodu ograničava učestanost na kojima ta cev može da radi kao detektor. Kristalne diode su uglavnom oslobođene ovih ograničenja i termički šumovi generirani u kristalu su zanemarljivi. Otuda se od kristala može dobiti veći odnos signal/šum, što kristal čini poželjnijim za demodulaciju složenih signala.

Kod mnogih radarskih sistema koristi se stopostotna amplitudnoimpulsna modulacija, pošto je to najprostiji način za modulisanje oscilatora

sa magnetronom i klistronom. Ona proizvodi i najveću vršnu snagu nosećih talasa. Isto tako, na ultravisokim učestanostima jačina statičke interferencije postaje manje značajna, čineći prednosti frekventnomodulisanih i faznomodulisanih sistema manje očiglednim.

Impulsna fazna modulacija predstavlja drugi način da se postignu isti rezultati koji se dobijaju impulsnom frekventnom modulacijom. PPM je pogodnija nego PFM kod koje se signalni impulsi direktno dovode do oscilatora noseće učestanosti.

Iako su širine talasnih opsegova velike na ultravisokim učestanostima i selektivnost biva nor-

malno visoka, pomeranja učestanosti svojstvena UKT opremi ograničavaju selektivnost i sledstveno tome ograničavaju raspoloživu širinu talasnog opsega.

Bilo u kojem obliku se koristila impulsna modulacija, a oblik zavisi od prirode podataka koji treba da se prenose — ona obezbeđuje najpotpunije korišćenje širine raspoloživih talasnih opsega uz minimalnu interferenciju usled spoljnih šumova i unakrsne modulacije između nosćih talasa. Iz tih razloga impulsna modulacija se sve više upotrebljava kako u vojnim, tako i u civilnim telekomunikacionim sistemima.

Pre no što se prede na Doplerov princip, treba pogledati na prethodnu tablicu. U njoj su sažeto prikazane tri vrste modulacije.

DOPLEROV PRINCIP

Doplerov princip obuhvata prividnu programu učestanosti svetlosti, zvuka ili elektromagnetskih talasa, koja se primećuje kada se izvor i tačka posmatranja kreću jedno u odnosu na drugo. Ovaj princip koristi se kod radarskih uređaja koji daju tačne podatke o visini, položaju u prostoru i brzini.

Doplerov efekat proizvodi jednu vrstu modulacije pomeranjem učestanosti izvan uređaja za prenošenje, nasuprot modulaciji o kojoj je ranije raspravljano, a koja se vršila u tim uređajima.

Kristijan Johan Doppler, koji je živeo u Pragu, još je 1842. godine tvrdio da kada se između posmatrača i nekog izvora stalnih vibracija (kao što su zvuk i svetlost) menja udaljenost, broj talasa izgleda kao da postaje veći ili manji od stvarne vrednosti prema tome da

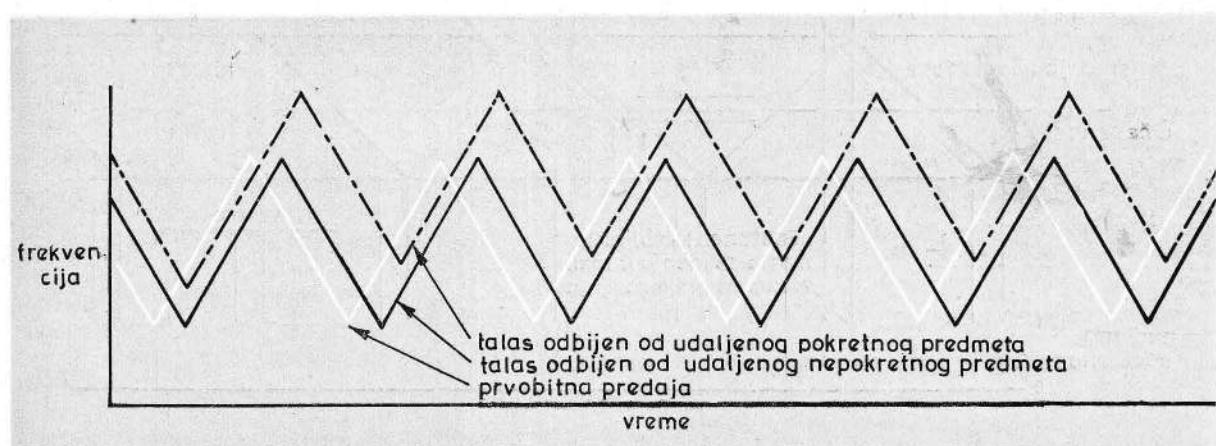
li se udaljenost smanjuje ili povećava. Ovaj efekat se svakodnevno zapaža kad se promeni visina tona zvižduka voza, u zavisnosti od toga da li se voz približava ili odlazi.

Elektromagnetski talasi raspolažu mnogim karakteristikama svetlosti, naročito ukoliko se njihova učestanost bliži učestanosti svetlosti. Doplerov princip primenjuje se kod elektromagnetskog zračenja, u vezi sa radio-uredajima i radarskim uređajima, radi utvrđivanja brzine i rastojanja pokretnih ciljeva kao što su vođeni projektili.

U jednom sistemu koji se može koristiti za praćenje projektila, predajnik radi na stalnoj i tačno poznatoj učestanosti (f_1). Zrak iz predajnika okida usmereni predajnik na letelici. A usmereni predajnik radi na dvostrukoj originalnoj učestanosti ($2f_1$). Ovaj signal primaju zemaljske prijemne stanice. Istovremeno, zemaljske stanice primaju i signale zemaljskog predajnika i udvajaju njegovu učestanost pomoću stepena za umnožavanje učestanosti. Zatim se dve udvojene učestanosti sabiraju. Rezultirajuća razlika učestanosti srazmerna je brzini pošto kretanje projektila stvarno menja emitovnu učestanost za iznos koji je srazmeran brzini projektila. Brzinski vektor između projektila i bilo koje tačke na zemlji može se tačno meriti pomoću doplerovog radio-sistema.

Integrисanjem vrednosti brzina od trenutka poletanja mogu se utvrditi sa velikom tačnošću vektori položaja cilja. Ako su upotrebljene dve stanice ili više stanica, položaj projektila u odnosu na određeni koordinatni sistem moguće je vrlo tačno odrediti.

Ako se, umesto prenošenja kontinuelnog talasa, doplerovskim sistemom prenosi testerasti, frekventno modulisani talas, mogu se istovre-



Sl. 205 — Doplerov efekat kod frekventne modulacije (testerasti talas)

meno odrediti i brzina i trenutno rastojanje između projektila i zemaljske stанице.

Ovaj princip prikazan je na slici 205. Treba zapaziti da je talas primljen sa udaljenog pokretnog predmeta pomeren kako udesno, tako i naviše u odnosu na originalnu emisiju. Sledstveno tome će i učestanost izbijanja biti vrlo mala ili veoma velika u uzastopnim poluperiodima. Zbir ove dve razne vrednosti učestanosti izbijanja nastale na ovaj način predstavlja meru rastojanja projektila od zemaljske stанице, a razlika između ove dve vrednosti učestanosti izbijanja jeste mera brzine projektila u odnosu na zemaljsku stanicu.

Na takav način frekventno modulisani radar određuje udaljenost od površine odbijanja merenjem pomeranja učestanosti između emitovanih i odbijenih talasa.

Za vreme dok talas putuje do površine i natrag, učestanost predajnika menja se pod uticajem frekventne modulacije. Kada se odbijeni talas vratи do predajnika, njegova učestanost razlikuje se za malu vrednost od učestanosti koja se tog trenutka emituje. Emitovani i odbijeni signali kombinuju se u jednom sabiračko-detektorskom kolu. Razlika učestanosti između njih razvija se kao *ton izbijanja*.

Razlika učestanosti postaje veća što se više povećava rastojanje između predajnika i predmeta od kojeg se vrši odbijanje. Tako se veličine visine i rastojanja mogu dobiti tumačenjem učestanosti izbijanja između emitovnog i primljenog signala u svakom datom trenutku. Na isti način mogu se dobiti i podaci o brzini.

Ovakav FM Doplerov sistem u stanju je da tačno meri kratka rastojanja, dok je impulsni radarski sistem ograničen širinom impulsa. Sa širinom impulsa od samo 0,2 mikrosekunde trajanja, minimalno rastojanje iznosi oko 30 metara. Stoga je FM Doplerov sistem praktičniji za takve primene kao što su avionski visinomeri i telemerenje, gde se moraju tačno meriti srazmerno kratka rastojanja i brzine. Impulsni radarski sistem pogodan je za merenje velikih udaljenja ili velikih visina, za koje svrhe se obično i koriste.

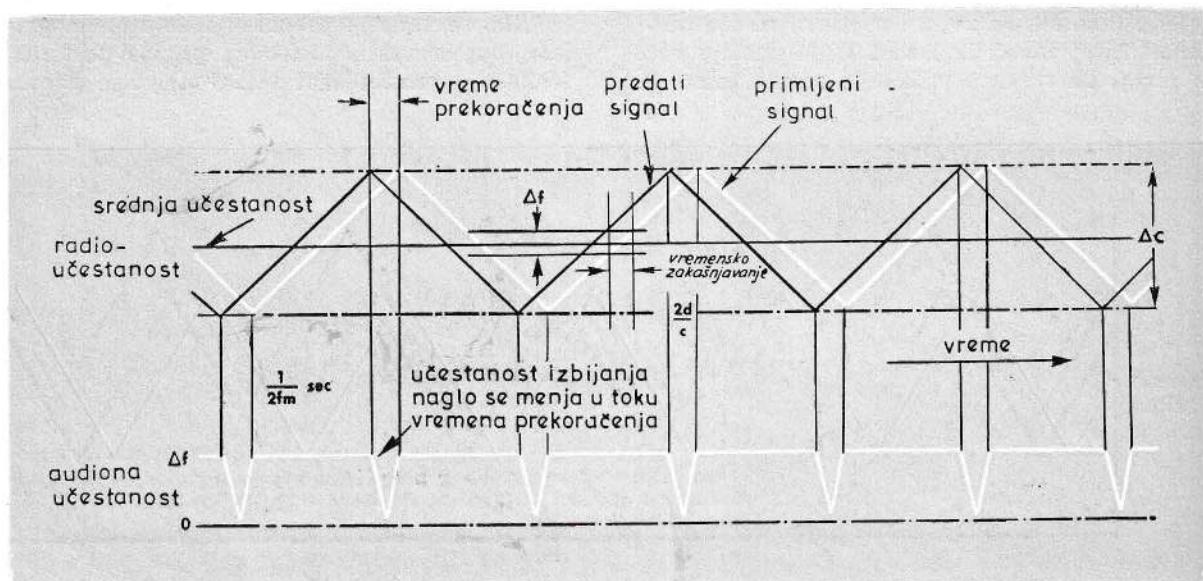
Upotreba FM Doplerovog sistema za merenje velikih rastojanja zahteva bi da se smanji veličina skretanja u frekventnoj modulaciji. Ali ovo smanjenje bi umanjivalo tačnost sistema prilikom merenja na kraćim rastojanjima.

VEZE IZMEĐU VREMENA I UČESTANOSTI KOD ANVELOPA MODULACIJE

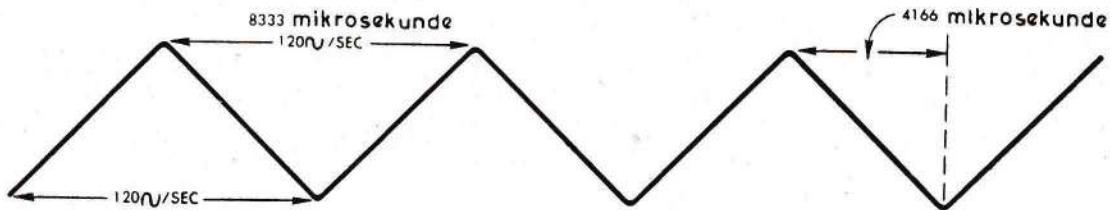
Na slici 206 prikazane su veze između vremena i učestanosti koje postoje kada se koristi trougaona anvelopa modulacije u FM radarskom sistemu. Emitovani i primljeni signali kombinuju se da bi proizveli tone izbijanja na audionim učestanostima.

Neprekidni testerasti talas predstavlja emitovani signal, a isprekidani testerasti talas primljeni signal, oba data kao funkcija vremena.

Ukupno skretanje frekventne modulacije (vrednost od vrha do vrha envelope modulacije) daje se kao ΔC megaherca. Ako je srednja



Sl. 206 — Grafičko predstavljanje veza između vremena i učestanosti



Sl. 207 — Vremenski odnos jednog trougaonog talasa od 120 herca

učestanost 220 megaherca, a skretanje je plus ili minus 400 kiloherca ($\Delta C = 0,8$ megaherca), znači da noseća učestanost tada odstupa u granicama od 219,6 do 220,4 megaherca.

Primljeni signal biva frekventno modulisan istom envelopom kao i emitovani signal, pošto signal zadržava svoj oblik za vreme odbijanja, ali je primljeni signal zato pomeren po vremenu za interval odbijanja. Interval odbijanja jednak je $2 d/c$, gde je »d« rastojanje u metrima od predajnika do površine odbijanja, a »c« brzina prostiranja radio-talasa u metrima u sekundi (oko 300.000 km/s, ili 300.000.000 m/s).

Kada nastane vremensko pomeranje, nastaje i odgovarajuće odstupanje učestanosti. Ovo se prikazuje vertikalnim razmakom (Δf) između punih i isprekidanih linija na dijagramu.

Veza između rastojanja (d) i razlike učestanosti (Δf) može se odrediti poređenjem sličnih trouglova na slici. Visina trouglastog talasnog oblika je ΔC , a polovina njegove osnove jeste $1/(2fm)$, gde je »fm« učestanost envelope modulacije. Odnos visine prema polovini osnove

je $2\Delta C/fm$, a to je jednak razlici učestanosti podeljenoj sa vremenskom razlikom:

$$2\Delta C/fm = \frac{\Delta f}{2d/c}$$

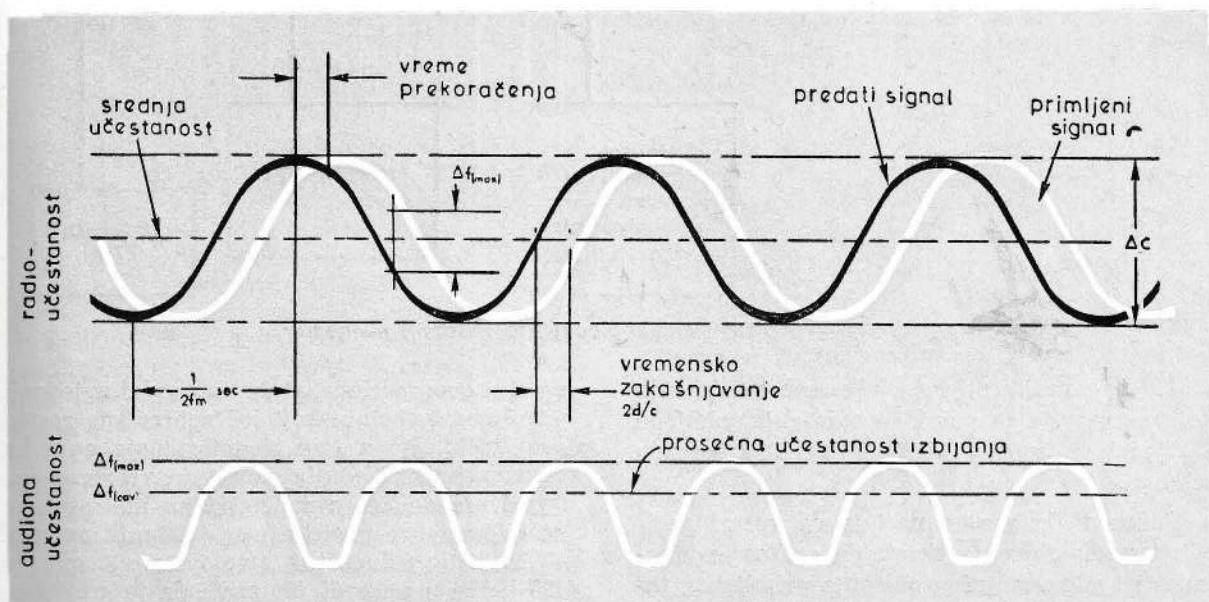
gde su ΔC , fm i Δf mereni u hercima u sekundi. Tada se nalazi veza između razlike učestanosti i rastojanja, kao:

$$\frac{\Delta f}{d} = \frac{4\Delta C/fm}{c}$$

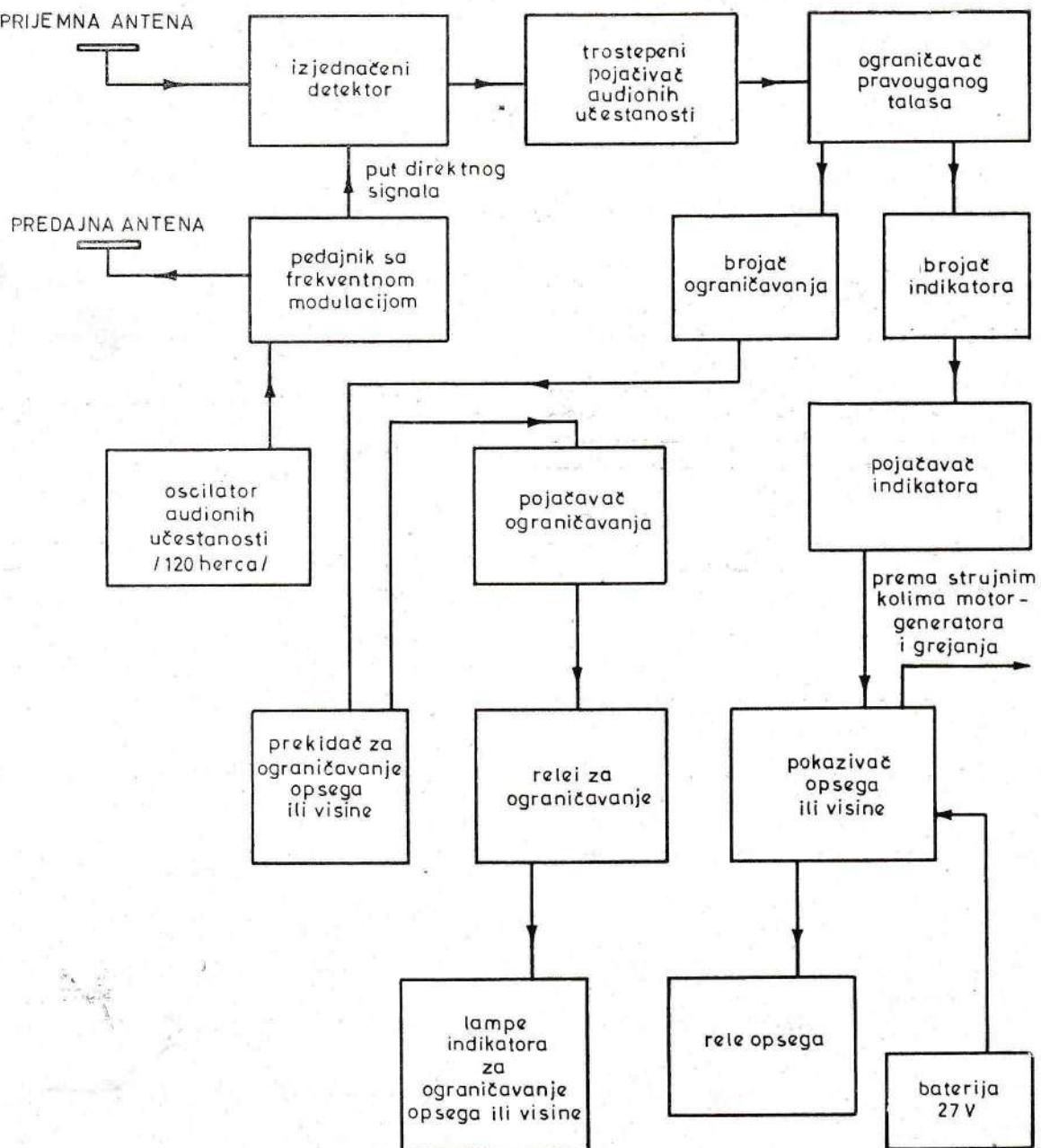
Treba primetiti da se osetljivost pokazivanja, izraženog u hercima u sekundi razlike učestanosti po metru, može povećati korišćenjem velikog skretanja učestanosti, ili visokom učestanošću modulacije, odnosno na oba načina.

Ako je ΔC jednak 0,8 megaherca, »fm« iznosi 120 herca u sekundi, a »c« je 300.000.000 metara u sekundi, odnos između razlike učestanosti prema rastojanju $\Delta f/d$ približno iznosi 1,28 herca u sekundi po metru rastojanja. Jednacina će glasiti:

$$\frac{4 \times 0,8 \times 10^6 \times 120}{300 \times 10^6} = 1,28$$



Sl. 208 — Učestanost izbijanja proizvedena prekoračenjem

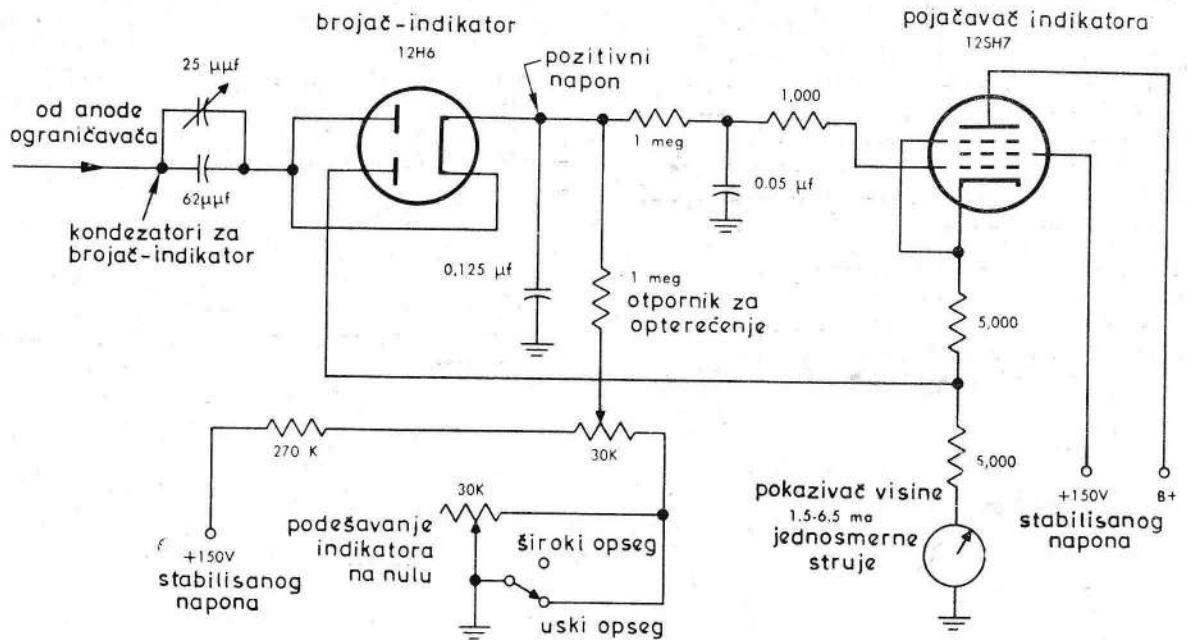


Sl. 209 — Tipični vazduhoplovni FM radarski visinomer

Na taj način najveća učestanost izbijanja koja se razvija sa površine odbijanja udaljene 1610 metara iznosi $1610 \times 1,28$ ili 2059 herca u sekundi.

Jedna mala greška nastaje za vreme perioda između obrtanja skretanja emitovne učestanosti i odgovarajućeg obrtanja primljenog talasa. Ovaj period prikazan je na slici 208 kao vreme prekoračenja. Emitovna učestanost, na

sredini ovog perioda, pada na vrednost jednaku primljenom signalu koji još neprestano raste u ovoj tački, što u tom trenutku daje nulu kao ton izbijanja. Međutim, trajanje vremena prekoračenja dostiže samo nekoliko mikrosekundi na kilometar, u poređenju sa 4166 mikrosekundi — koliki je poluperiod envelope modulacije pri 120 herca u sekundi. To znači da je greška usled efekta prekoračenja zanemarujuće mala. Ove vremenske veze prikazane su na slici 207.



Sl. 210 — Brojačko strujno kolo s dvojnom diodom

Ako je modulacija u obliku sinusoidalne anvelope, kao što je to na slici 208, razlika učestanosti između prekoračenja nije više stalna. Umesto toga, razlika se menja od nule kod prekoračenja, do maksimuma koji nastaje kada emitovna učestanost prelazi kroz svoju srednju vrednost. Pomoću pogodnih strujnih kola meri se učestanost izbijanja. Ova vrednost odgovara onoj koju daje modulacija pomoću trougaonog talasa.

Jednačina:

$$\frac{\Delta f}{d} = \frac{4\Delta C_{fm}}{c}$$

Koristi se za predviđanje sredine učestanosti izbijanja (Δf), kada se primeni sinusoidalna modulacija.

PRIMENA DOPLEROVOG PRINCIPIJA U FM RADARSKOM VISINOMERU

Funkcionalna blok-šema na slici 209 prikazuje tipični FM radarski visinomer koji se služi Doplerovim principom za određivanje visine aviona.

Jedno tipično strujno kolo za brojanje sa dvostrukom diodom, koje se može upotrebiti u brojaču — indikatoru prikazanom na prethodnoj blok-šemi, razvija pozitivan napon jednosmerne struje srazmeran učestalosti tona izbijanja. Ovo strujno kolo, prikazano na slici 210, uključuje u sebi dvojne diode (12H6), kroz čiji

jedan deo prolaze pozitivni poluperiodi izlaznog napona ograničavača puneći kondenzator od 0,125 μF i otpornik otočno vezan za opterećenje. Vrednosti kapacitivnosti i otpora tako su izabrane da naboј kondenzatora dolazi preko otpornika brzinom približno jednakom provođenju naboja kroz diodu.

Na taj način, kada pozitivni pravougaoni talasi s ograničavača dolaze povećanom brzinom (veća učestanost tona izbijanja), direktni napon na kondenzatoru teži da se poveća. Napon se smanjuje kada talasi pristižu smanjenom brzinom.

Ovaj napon propušta se kroz niskopojasni RF filter koji daje srednju vrednost direktnog napona i dovodi ga na rešetku izlazne pojačavačke cevi (12SH7).

Jedan miliampеретар u katodnom strujnom kolu izlazne pojačavačke cevi registruje, u opsegu od 5 miliampera (1,5 — 6,5 mA), srednju vrednost direktnog napona na rešetki. Ovaj merni instrument kalibriran je direktno u metrima. Skala podeljaka »HI — LO« (visoko — nisko), koja je prikazana, uključuje se istovremeno sa prekidačem koji kontroliše ukupno skretanje emitovanog signala, tako da se uvek tačno izabira ona merna skala na instrumentu koja odgovara opsegu širokog ili uskog odstupanja.

Deo napona kroz katodni otvor vraća se natrag na drugi deo dvojne diode (12H6) u bro-

jačkom strujnom kolu. Ova dioda propušta negativne polovine izlaznog napona ograničavača prema zemlji. Time se kondenzator prazni za kuplovanje i ostaje spreman da primi sledeću pozitivnu polovinu izlaznog talasa ograničavača. Povratna sprega sa indikatorskog pojačavača daje takođe prednapon diodi i čini pokazivanje linearnim.

Iz ovog se može videti značaj Doplerovog principa na polju projektila. Kao što je u ovom odeljku izneseno, Doplerov efekat se naširoko koristi u elektronskoj opremi.

VAŽNOST RAZUMEVANJA MODULACIJE

Pošto se noseći talas mora menjati u amplitudi, učestanosti, ili fazi pre no što je u stanju da prenosi obaveštenja, ovakve promene su od bitnog značaja za efikasnu upotrebu elektronske opreme.

Stoga je potrebno da se u potpunosti poznaju vrste i funkcije modulacije. Treba da se shvati pojava modulacije pre nego što se pređe na sledeće glave, koje se bave iscrpnim proучavanjem sastavnih delova jednog projektilskog sistema.