

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Matija Krajcar

POSTUPCI I METODE ISPITIVANJA PITOT-STATIČKOG
SUSTAVA ZRAKOPLOVA

ZAVRŠNI RAD

ZAGREB, 2019.

Zagreb, 23. studenoga 2018.

Zavod: **Zavod za aeronautiku**
Predmet: **Zrakoplovni instrumenti**

ZAVRŠNI ZADATAK br. 4974

Pristupnik: **Matija Krajcar (0135237931)**
Studij: **Aeronautika**
Smjer: **Pilot**
Usmjerenje: **Civilni pilot**

Zadatak: **Postupci i metode ispitivanja Pitot-statičkog sustava zrakoplova**

Opis zadatka:

Opisati sastavnice, konfiguraciju i značajke Pitot statičkih sustava malih i velikih zrakoplova. Navesti operativna ograničenja i potencijalne probleme pri eksploataciji. Opisati dijagnostičku opremu i metode za ispitivanje ispravnosti Pitot statičkog sustava. Na konkretnom zrakoplovu opisati i primijeniti propisane ispitne postupke i metode uz odgovarajuće proračune potrebnih korekcija.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:

prof. dr. sc. Tino Bucak

**Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti**

ZAVRŠNI RAD

**POSTUPCI I METODE ISPITIVANJA PITOT-STATIČKOG
SUSTAVA ZRAKOPLOVA
AIRCRAFT PITOT-STATIC SYSTEM TESTING PROCEDURES
AND METHODS**

Mentor: prof. dr. sc. Tino Bucak

Student: Matija Krajcar

JMBAG: 0135237931

Zagreb, kolovoz 2019.

POSTUPCI I METODE ISPITIVANJA PITOT-STATIČKOG SUSTAVA ZRAKOPLOVA

SAŽETAK

Pitot-statički sustavi zrakoplova su ključni za sigurnost letenja, te ih je potrebno održavati i periodički ispitivati njihovu ispravnost. Ukratko je opisan princip rada, potencijalni problemi i ograničenja pitot-statičkih sustava, te su, uz pomoć literature, utvrđene sličnosti, ali i razlike između sustava malih i velikih zrakoplova i napravljena je usporedba između njihovih ispitnih postupaka. Opisana je i ispitna oprema: sastavni dijelovi, princip rada, kao i korištenje prilikom ispitivanja.

Ključne riječi: ispitivanje, pitot-statički sustavi, održavanje pitot-statičkih sustava

SUMMARY

Aircraft pitot-static systems are crucial to flight safety and must be maintained and periodically tested for correct operation. Their principle of operation, along with potential problems and operational limitations is described. By referencing literature, similarities and differences between small and large aircraft were confirmed, and the difference in test procedures were compared. Test equipment, it's principle of operation and how it's used in pitot static testing is also described.

Key words: testing, pitot-static systems, maintenance of pitot-static systems

Sadržaj

1. UVOD.....	1
2. OPĆENITO O PITOT-STATIČKIM SUSTAVIMA	2
2.1. PITOT CIJEV.....	3
2.2. STATIČKI OTVORI	4
2.3. TLAČNI VODOVI	5
2.4. INSTRUMENTACIJA.....	6
3. KONFIGURACIJE I ZNAČAJKE PITOT-STATIČKIH SUSTAVA.....	6
3.1. MALI ZRAKOPLOVI.....	7
3.2. VELIKI ZRAKOPLOVI	9
4. OPERATIVNA OGRANIČENJA I POTENCIJALNI PROBLEMI U EKSPLOATACIJI	11
5. DIJAGNOSTIČKA OPREMA.....	13
6. POSTUPAK ISPITIVANJA.....	16
6.1. ISPITIVANJE UREĐAJA.....	16
6.2. ISPITIVANJE PITOT SUSTAVA	16
6.3. ISPITIVANJE STATIČKOG SUSTAVA	17
7. ISPITIVANJE U PRAKSI NA ZRAKOPLOVU	17
8. USPOREDBA IZMEĐU VELIKIH I MALIH ZRAKOPLOVA	21
9. ZAKLJUČAK	22
LITERATURA	23
POPIS SLIKA.....	24
POPIS TABLICA	24
POPIS KRATICA	24

1. UVOD

Pitot-statički sustavi zrakoplova, kao i pitot-statički instrumenti, a to su, u osnovi, visinomjer, brzinomjer i variometar, mogu se smatrati najbitnijim instrumentima za upravljanje zrakoplovom. Opće je poznato da se zrakoplovi teži od zraka moraju kretati određenim područjem brzina, ali i nalaziti na određenoj visini od tla, kako bi siguran let bio moguć. Slom uzgona, odgoda polijetanja u slučaju otkaza motora, rotacije pri polijetanju, penjanja, krstarenja i ostali režimi su svi definirani s nekom vrijednosti brzine. Piloti te vrijednosti konstantno koriste, u različitim fazama leta, kako bi postigli zahtijevane performanse zrakoplova. Osim za separaciju od terena, podatak o visini se koristi i za definiranje zračnih putova, odlaznih i dolaznih ruta, prilaza za slijetanje, međusobna razdvajanja više zrakoplova, te je isto ključan parametar za let. Može se stoga zaključiti da bi i najmanji kvar u pitot-statičkim sustavima mogao biti koban za zrakoplov.

Kao i svaka mehanička naprava, pitot-statički sustavi imaju svoje nedostatke, greške i načine na koji se kvare. Zbog toga ih je potrebno redovito održavati i ispitivati, a ti se postupci provode periodički prilikom servisnih pregleda zrakoplova. Potrebno je razumijevanje principa rada pitot-statičkih sustava i mogućih problema koji ih mogu zadesiti prilikom eksploatacije zrakoplova, kako bi se ispitivanje i otklanjanje grešaka moglo provesti na siguran način.

U ovome radu biti će ukratko pisan princip rada pitot-statičkih sustava, sastavni dijelovi, razlike između malih i velikih zrakoplova, te, već spomenuta, operativna ograničenja i potencijalni problemi u eksploataciji. Opisati će se i dijagnostička oprema, njezin princip rada, kao i upotreba, te će se na koncu opisati kako izgleda ispitivanje u praksi na samome zrakoplovu.

2. OPĆENITO O PITOT-STATIČKIM SUSTAVIMA

Pitot-statički sustavi služe za mjerenje tlakova zraka koji okružuje zrakoplov, te njihov prijenos prema instrumentima ili uređajima koji ih koriste za svoj rad. Mjere se dva različita tlaka: statički i totalni tlak.

Statički tlak je tlak stupca zraka koji se nalazi iznad zrakoplova, odnosno sila na neku površinu koju vrši težina stupca zraka u atmosferi koji se nalazi iznad zrakoplova.

Tlak je skalarna veličina, ali je svejedno moguće definirati silu tlaka koja je jednaka tlaku te djeluje okomito na neku površinu. Ako je fluid statičan, izmjereni tlak jednak je u svim smjerovima, no ako je fluid u pokretu, tada izmjereni tlak ovisi o smjeru kretanja. Time je definiran dinamički tlak – tlak koji nastaje uslijed strujanja fluida oko nekog tijela, odnosno gibanja tijela kroz fluid. Stoga zaključujemo da je iznos dinamičkog tlaka definiran s kvadratom brzine strujanja pomnoženom s polovinom gustoće nekog fluida, odnosno brzina strujanja nekog fluida jednaka je korijenu dijeljenja iznosa dinamičkog tlaka s polovinom gustoće nekog fluida, te nam je ova jednadžba pogodnija za svrhe određivanja brzine fluida [1], odnosno zrakoplova, pomoću pitot-statičkih sustava. Izračun dinamičkog tlaka q i brzine v obavlja se prema formulama (1) i (2) [1]:

$$q = \frac{1}{2} \times \rho \times v^2 \quad (1)$$

$$v = \sqrt{\frac{q}{\frac{1}{2} \times \rho}} \quad (2)$$

Totalni ili ukupni tlak je, kao što mu i ime govori, suma statičkog i dinamičkog tlaka. Pitot-statički sustavi mogu izmjeriti totalni i statički tlak. Drugim riječima, oni ne mogu izravno izmjeriti dinamički tlak q , stoga se on izračunava iz jednadžbe (3) [1]:

$$q = p_t - p_s \quad (3)$$

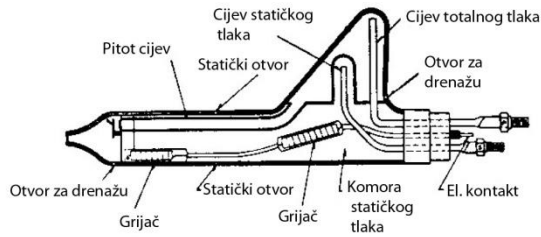
Osnovni pitot-statički sustavi sastoje se od malog broja dijelova, a to su: pitot cijev i statički otvori (tzv. sonde), tlačni vodovi i instrumentacija.

2.1. PITOT CIJEV

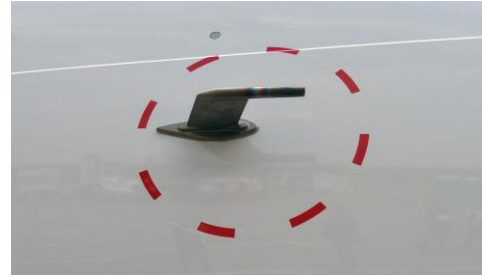
Pitot cijev je duguljasta i glatke površine, unutrašnjeg promjera oko 6 mm, izrađena tako da ima što manji aerodinamički utjecaj, odnosno tako da strujanje oko nje bude laminarno. [2] Unutrašnjost pitot cijevi izvedena je tako da ima barem jednu drenažnu rupu malih dimenzija koja omogućuje istjecanje kondenzirane vlage, dok je oko središnje cijevi omotan grijač koji služi za sprječavanje zaleđivanja, a o kojem će se govoriti kasnije u radu [3].

Pitot cijev može biti izvedena tako da uključuje i statičke otvore, te zbog toga sadrži i statičku komoru, unutar koje je uspravna cijev koja vodi statički tlak izvan cijevi dalje prema vodovima [4]. Poprečni presjek uobičajene pitot-statičke cijevi prikazan je na slici 1., a pitot cijev zrakoplova Airbus A320 je prikazana na slici 2.

Pitot cijev može biti smještena na raznim dijelovima zrakoplova: na nosnom konusu, bočno na trupu, na donjoj strani krila ili na vrhu vertikalnog stabilizatora. Bitno je da se nalazi u neporemećenoj struji zraka, tj. na mjestu gdje je utjecaj strujanja oko zrakoplova najmanje izražen na slobodnu struju zraka. Pitot cijev okrenuta je tako da je njezina središnja os poravnata s uzdužnom osi zrakoplova. Zahvaljujući takvom položaju, struja zraka izravno ulazi u središnji otvor te zatim stagnira unutar cijevi (brzina zraka pada na nulu), čime se tlak povećava na vrijednost totalnog [4].



Slika 1. Poprečni presjek pitot-statičke cijevi [4]



Slika 2. Pitot cijev zrakoplova Airbus A320
Izvor:

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:A320neo_Pitot_Tube.jpg

2.2. STATIČKI OTVORI

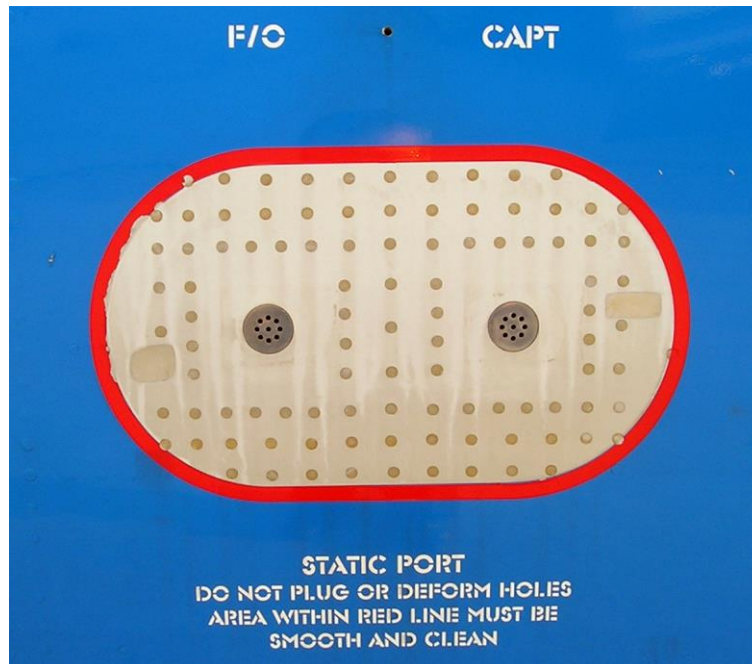
Kako bi izmjerili vrijednost statičkog tlaka, na zrakoplov ili, u nekim izvedbama, na pitot cijev postavljaju se statički otvori: provrti svega par milimetara u promjeru, postavljeni paralelno uz strujanje zraka na način da minimalno utječu na okolno strujanje kako ne bi uzrokovali poremećaje u vlastitom mjerenju, te pod malim kutom prema dolje kako bi se osigurala drenaža vlage. Područje oko otvora, kao i sami otvori, ne smiju se bojati, zbog promjene geometrije otvora, ali i kako bi utjecaj topline na izmjeru bio što manji (naime, boja bi služila kao toplinski izolator) [3].

Budući da se smjer strujanja relativne struje zraka oko zrakoplova mijenja ovisno o fazi leta, manevrima i brzini leta, paralelnost statičkih otvora sa strujom zraka ne može uvijek biti osigurana te se zato vrši statičko balansiranje – ugradnja dodatnih statičkih otvora na suprotnu stranu trupa [4,5], dok se ostale greške bilježe prilikom ispitivanja u letu i iznose u operativnom priručniku zrakoplova kao tablica s korekcijama [3].

Kalibracija statičkog sustava, odnosno izračun greške izmjere visine dh , može se izračunati pomoću jednadžbe (4) [6]. Omjer gustoće okolnog zraka i gustoće zraka u standardnoj atmosferi je označen slovom σ , a V_c je kalibrirana brzina zraka. Kod kvalitetno dizajniranih pitot sustava, greška ugradnje pitot cijevi dV_c je minimalna, odnosno $dV_c \approx 1$.

$$dh = 0,8865 \times (dV_c) \times \left\{ 1 + 0,2 \times \left\{ \frac{V_c}{661,5} \right\}^2 \right\}^{2,5} \times \left\{ \frac{V_c}{\sigma} \right\}, \text{ ft.} \quad (4)$$

Statički otvor zrakoplova Airbus A320 je prikazan na slici 3. Jasno je uočljivo područje koje mora biti potpuno čisto od kontaminanata.



Slika 3. Statički otvori zrakoplova Airbus A320
Izvor: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Static_port.JPG

2.3. TLAČNI VODOVI

Pitot-statički sustavi rade na relativno malim tlakovima te su zbog toga vodovi tlakova relativno malih dimenzija i izrađeni od fleksibilnih, ali ne i rastezljivih (zbog utjecaja na izmjereni tlak) materijala, kako bi se olakšala ugradnja na zrakoplov i povećala otpornost na vibracije. Izrađuju se od plastičnih (najčešće polietilen) ili gumenih masa, te su na manjim zrakoplovima obojani kako bi se raspoznalo koji tlak vode, a čime se smanjuje mogućnost pogreške prilikom održavanja [5,6].

Na najnižim točkama vodova ugrađuju se ventili za drenažu, koji se povremeno otvaraju kako bi se ispustila voda koja se akumulira uslijed nakupljanja vlage ili oborina [3].

Neki zrakoplovi koji imaju više pitot cijevi ili statičkih otvora, imaju mogućnost, uz pomoć preklopnih ventila, odabrati koji će izvor tlaka koristiti instrumenti [4], a što se pak koristi u izvanrednim situacijama koje će biti opisane kasnije u radu.

2.4. INSTRUMENTACIJA

Tlakovi koji su izmjereni od strane pitot-statičkog sustava dovode se do sljedećih instrumenata: visinomjera, brzinomjera i variometara. Ti se isti tlakovi uz pomoć zatvorenih, odnosno otvorenih kalibriranih kapsula pretvaraju u mehanički pomak, koji prijenosni mehanizam unutar instrumenta pretvara u indikaciju određenog parametra. Visinomjer i variometar koriste samo statički tlak za svoj rad, dok brzinomjer koristi i totalni i statički tlak, kako bi se izračunao dinamički tlak.

Digitalni kokpiti ne koriste klasične instrumente, nego iznose tlakova pretvaraju u električni signal, koji zatim ADC (Air Data Computer – računalo za podatke o okolini) obrađuje i priprema za prikazivanje na digitalnom prikazniku [8].

3. KONFIGURACIJE I ZNAČAJKE PITOT-STATIČKIH SUSTAVA

Neki elementi konfiguracije pitot-statičkih sustava, poput mjesta ugradnje i broja osjetila, bili su već ranije spomenuti u radu, no ovdje će biti nešto opširnije razrađeni.

O mjestu ugradnje pitot cijevi već je rečeno da treba biti u relativno neporemećenoj struji zraka, na trupu, donjaci krila ili na nosnom konusu [4]. Ugradnja na trupu je problematična kod konfiguracija zrakoplova koji imaju elisni pogonski sustav u „nosu“, iz razloga

što elisa svojom rotacijom stvara jake vrtloge, koji bi zatim utjecali na mjerenje pitot cijevi, a i sama razlika tlakova uz pomoć koje elisa stvara potisak uzrokuje ubrzanje struje zraka, što bi pak davalo lažnu indikaciju brzine zrakoplova. Zbog toga zrakoplovi s takvom konfiguracijom imaju pitot cijevi postavljene na donjaku krila. Pitot cijev ugrađuje se na donjaku ili nešto ispred napadnog ruba krila zbog toga što se preko gornjake struja zraka ubrzava te bi stoga opet imali neispravnu indikaciju brzine.

Kod nadzvučnih zrakoplova, pitot cijevi ugrađuju se tako da su najistureniji dio zrakoplova kako bi se utjecaj udarnih valova skoro pa potpuno reducirao, odnosno da budu izvan „Mach-ovog konusa“¹. Postavljaju se na nosni konus, ispred radara, ili neposredno iza „nosa“, ali su izdužene tako da se opet nalaze „prve na udaru“.

Broj ugrađenih osjetila ovisi isključivo o potrebnoj redundanciji zrakoplova. Drugim riječima, veći zrakoplovi, ali i oni opremljeni za instrumentalno letenje, moraju imati više instrumenata koji pokazuju isti letni parametar (npr. dva brzinomjera, visinomjera, itd.) [6]. Pitot-statički sustavi takvih zrakoplova izrađuju se da su međusobno izolirani, tako da kvar jednog ne utječe na funkciju drugog.

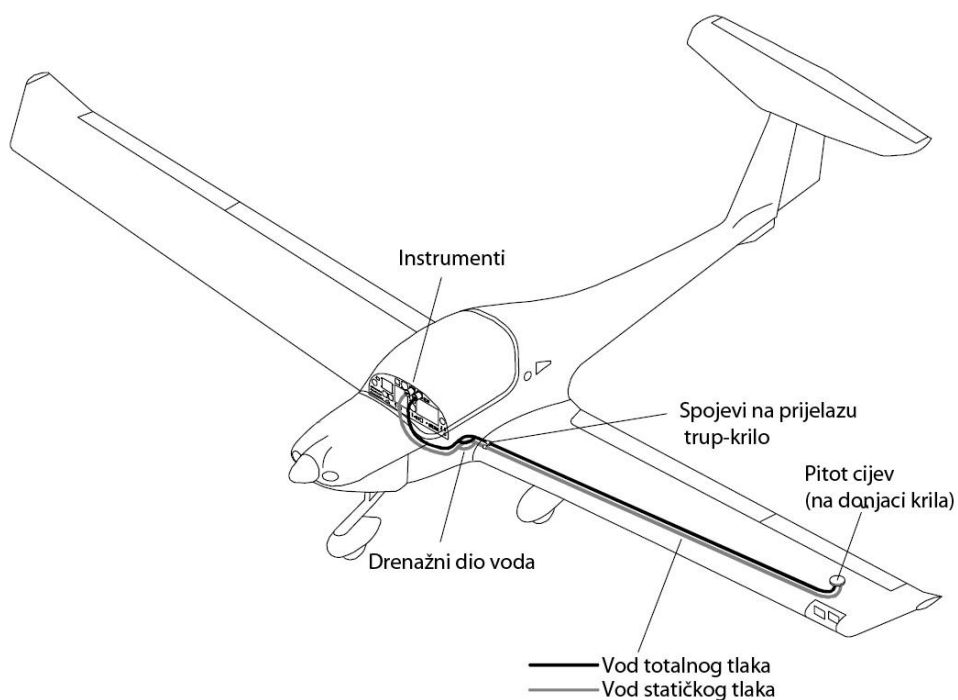
3.1. MALI ZRAKOPLOVI

Pitot-statički sustavi uobičajenih malih zrakoplova poprilično su jednostavni, izvedeni da budu dostatni za potrebe generalne avijacije, jeftini i lagani za održavanje.

Za primjer se može uzeti zrakoplov proizvođača „Diamond“, model DV-20; mali trenažni zrakoplov koji može letjeti isključivo u povoljnim meteorološkim uvjetima. Pitot-statička cijev nije grijana, te mjeri totalni i statički tlak, tako da nema potrebe za dodatnim statičkim otvorima na trupu. Izvedena je u obliku male peraje i smještena na donjaci lijevog krila. Na nju su

¹ Mach-ov konus – stožac koji čine poremećaji tlaka, koji imaju oblik sfere, oko objekta koji se kreće nadzvučnom brzinom [9].

povezani plastični, fleksibilni i obojani vodovi koji se protežu kroz krilo, u korijenu prolaze kroz pregradu i ulaze u kabinu. Zatim se ispod sjedala granaju „T“ spojnicom u dva voda, od koji gornji prolazi izravno prema instrumentima, dok se donji grana prema donjem dijelu kabine i opet se „T“ spojnicom spaja s gornjim. Time se stvara najniža točka u sustavu u kojoj se nakuplja voda, ali je ujedno i izdvojena od ostatka sustava. Zbog pojednostavljenja održavanja, vodovi totalnog tlaka su zelene, dok su vodovi statičkog tlaka plave ili ljubičaste boje. Tlak se zatim dovodi do uobičajenih mehaničkih instrumenata: brzinomjera, visinomjera i variometara [7]. Shema sustava prikazana je na slici 4.

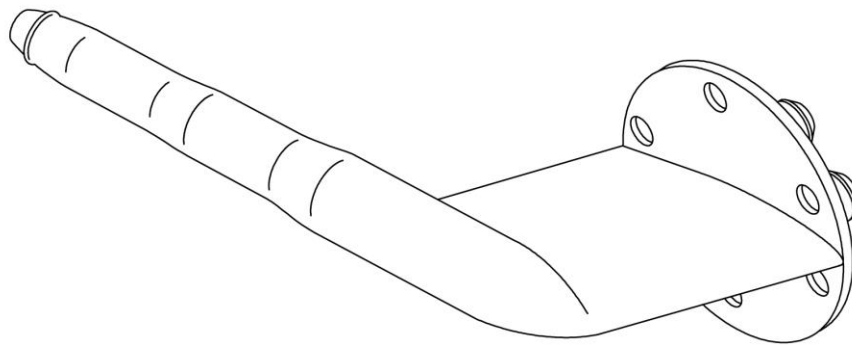


Slika 4. Pitot-statički sustav zrakoplova DV-20 [7]

3.2. VELIKI ZRAKOPLOVI

Pitot-statički sustavi velikih zrakoplova razmjerno su kompleksniji te imaju dodatne podsustave koji omogućavaju ispravnu operaciju u svim uvjetima letenja, ali i pretvorbu izmjerenih parametara (tlakova) u digitalni format (zbog obrade u računalima i prikaza u digitalnom obliku).

Za primjer se može uzeti zrakoplov Dash 8 Q400 kanadskog proizvođača „Bombardier“; regionalni putnički turbo-elisni zrakoplov, kapaciteta do 80 sjedala. Ugrađene su dvije pitot-statičke cijevi (prikazane na slici 5.), simetrično na lijevoj i desnoj strani trupa, pod kutom od 9 stupnjeva u odnosu na horizontalnu os zrakoplova, odnosno pod kutom od 5 stupnjeva u odnosu na ravninu okolne oplata zrakoplova. Na vrhu se nalazi otvor koji mjeri totalni tlak, a izrađen je tako da je smanjena osjetljivost pitot-statičke cijevi na promjene kuta strujanja zraka, odnosno na promjene napadnog kuta i klizanje zrakoplova. Statički se otvori nalaze na bočnom dijelu pitot-statičke cijevi. Drenaža se ostvaruje malim provrtima na pitot-statičkoj cijevi, a orijentacija statičkih otvora osigurava drenažu statičkog voda. Kako bi se spriječilo zaleđivanje, pitot-statička cijev opremljena je električnim grijačem s automatskom regulacijom grijanja.

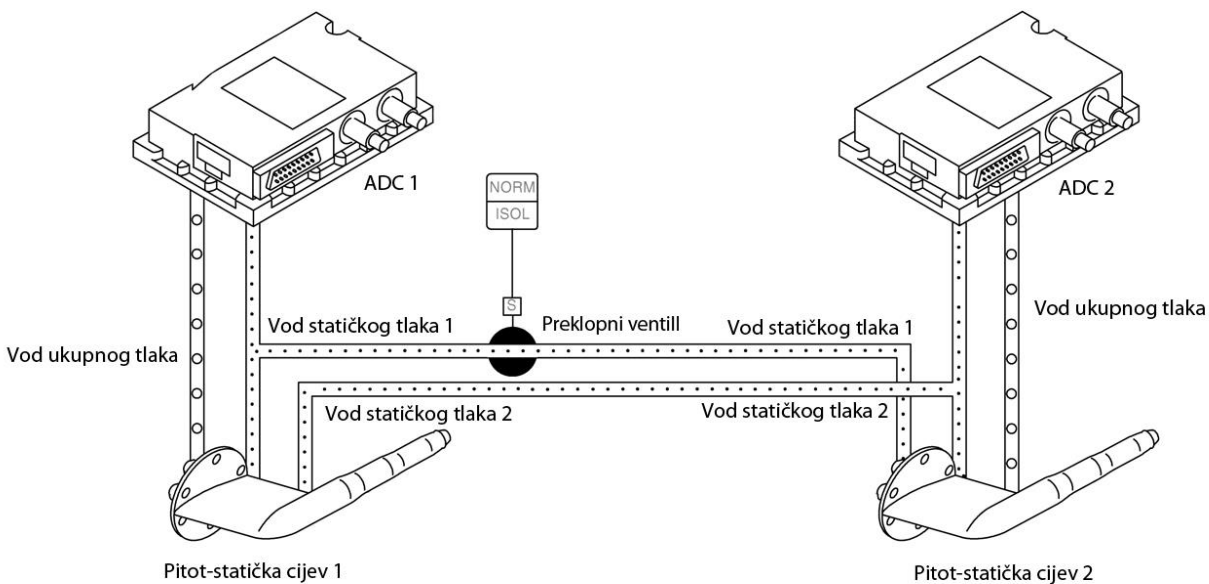


Slika 5. Pitot cijev zrakoplova Dash 8 Q400 [8]

Putem savitljivih cijevi, pitot-statička cijev povezana je na aluminijske vodove unutar zrakoplova, koji su zatim povezani s ADC-om. Vodovi iz lijeve i desne pitot-statičke cijevi

najčešće su međusobno povezani putem „T“ spojnica kako bi se dobila srednja vrijednost izmjere oba osjetila, ali je statičke izvore moguće odvojiti putem prekidača koji pokreće elektromagnetski ventil. Vodovi su ugrađeni pod kutom većim od 3,5 stupnjeva kako bi se osigurala ispravna drenaža prema drenažnim cijevima, kojih ima po dvije na svakoj strani, znači ukupno četiri u cijelom zrakoplovu [8].

Izmjereni se tlakovi ne dovode izravno do instrumenata, nego do ADC-a, kao što je prikazano na slici 6., koji ih zatim obrađuju i automatski provode korekcije uslijed greške položaja pitot-statičke cijevi (ova greška biti će opisana kasnije u radu). Uz podatak o vanjskoj temperaturi i referentnom barometarskom tlaku, izračunavaju se podaci o brzini i visini zrakoplova. Izračunati se podaci zatim odašilju preko zrakoplovne sabirnice prema standardu ARINC 429, ostalim uređajima i prikaznicima u zrakoplovu [8][10].



Slika 6. Pitot-statički sustav i ADC-ovi [8]

4. OPERATIVNA OGRANIČENJA I POTENCIJALNI PROBLEMI U EKSPLOATACIJI

Pitot-statički sustavi ograničeni su promjenama strujanja oko zrakoplova, koje su sasvim uobičajene u svakome letu zrakoplova.

Najznačajnija je već spomenuta greška položaja pitot-statičke cijevi, koju uzrokuje nejednakost strujanja zraka oko zrakoplova, a koje je neizbježno uslijed manevriranja zrakoplova ili promjene konfiguracije uređaja za povećanje uzgona. Promjene u strujanju uzrokuju promjene statičkog tlaka oko statičkih otvora, a nastrojavanje pod ne-paralelnim kutom u odnosu na pitot cijev uzrokuje pogrešnu izmjeru totalnog tlaka. Greške mjerenja statičkih otvora mogu se donekle umanjiti korištenjem „statičkog balansiranja“, odnosno ugradnjom više statičkih otvora simetrično, ali na suprotne strane trupa zrakoplova, čime se dobiva prosjek statičkog tlaka oko zrakoplova [4,5]. Prilikom testiranja novog tipa zrakoplova u letu, greške uslijed promjene konfiguracije mjere se i bilježe, pa se kasnije unose u ADC kako bi ih zrakoplov sam ispravljao, ili, kao što je u slučaju manjih zrakoplova, se iznose u obliku tablica za korekciju u priručniku zrakoplova [8,11,3].

Turbulencije uzrokuju lokalne poremećaje u tlaku, koji pak uzrokuju trenutne pogrešne izmjere tlaka, a one se najlakše očituju u malim zrakoplovima kao kratkotrajno poskakivanje pokazivača na instrumentima. Pošto su lagane turbulencije neizbježne, a jake se izbjegavaju promatranjem meteoroloških podataka ili slike iz meteo-radara, ne provode se nikakve korekcije ove greške [3].

Potencijalni problem u eksploataciji pitot-statičkih sustava je zaleđivanje, ali i strani predmeti poput kukaca ili zaostale opreme za održavanje koji mogu uzrokovati začepljenje pitot cijevi ili statičkih otvora. Oni predstavljaju veliki problem za sigurnost zrakoplova, budući da pilot dobiva neispravnu indikaciju parametara ključnih za let. Očitovanje greške u indikaciji ovisi o tome je li začepljena pitot cijev ili statički otvor. Začepljenje pitot cijevi uzrokuje indikaciju stalne brzine u horizontalnom letu, dok penjanjem indikacija brzine raste zato što totalni tlak u

pitot cijevi ostaje konstantan, a statički se smanjuje, pa oduzimanjem dobivamo veći dinamički tlak, odnosno veću izmjerenu brzinu, i obrnuto kod spuštanja zrakoplova. Začepljenje statičkih otvora utječe na indikaciju brzinomjera, ali i visinomjera i variometra, koji će pokazivati konstantnu visinu, dok će brzinomjer pokazivati brzinu ovisno o visini zrakoplova. Porastom visine s blokiranim statičkim otvorom (statički tlak konstantan), totalni će se tlak smanjivati pri konstantnoj brzini leta pa će izračunati dinamički tlak biti manji. Prilikom spuštanja zrakoplova biti će obrnuto. [3].

Još jedan potencijalni problem pitot-statičkih sustava, odnosno vodova, je propuštanje zraka, koje uzrokuje pogrešne indikacije teže uočljive pilotu u letu zrakoplova. Propuštanje u vodu totalnog tlaka, ali i u statičkom vodu, kod zrakoplova koji imaju kabinu pod tlakom uzrokuje indikaciju manje brzine od stvarne, a propuštanje u statičkom vodu kod zrakoplova koji nemaju kabinu pod tlakom uzrokuje indikaciju veće brzine od stvarne. Indikacija veće brzine od stvarne je znatno opasnija od indikacije manje brzine od stvarne, budući da dolazi do sloma uzgona na indiciranoj brzini većoj od one koja je stvarna za taj tip zrakoplova [3].

Utjecaj blokiranog statičkog otvora se na nekim tipovima zrakoplova može privremeno (u letu) spriječiti, tako što su ugrađeni dodatni statički izvori koji služe za takve izvanredne slučajeve. Odabir alternativnog izvora statičkog tlaka vrši se u pilotskoj kabini pomoću ventila koji se nalaze na pitot-statičkim vodovima. Kod zrakoplova koji nemaju kabinu pod tlakom, alternativni izvor statičkog tlaka obično je izveden tako da mjeri tlak koji se nalazi u kabini, budući da je približno jednak statičkom tlaku koji bi bio izmjeren izvan nje (jer je kabina pod laganim podtlakom zbog Bernoullijevog učinka), ali je bitno da pilot konfigurira zrakoplov za takvu situaciju, u smislu postavka ventilacije i prozora na kabini, jer oni utječu na tlak u kabini [3].

5. DIJAGNOSTIČKA OPREMA

Uređaji za ispitivanje pitot-statičkih sustava izvedeni su kao prijenosne naprave koje imaju mogućnost generiranja tlaka ili podtlaka, kako bi imitirali atmosferu oko zrakoplova u letu. Sastoje se od nekoliko dijelova: spremnici zraka, ručne ili eksterne pumpe, manometri, preklopni ventili, ispušni ventili, visinomjer, brzinomjer, te dodatni priključci. U ovome radu, kao primjer je uzet uređaj proizvođača „Barfield“, model 1811GA (prikazan na slici 7.), te će njegova izvedba i funkcija biti opisani u nastavku teksta [12].

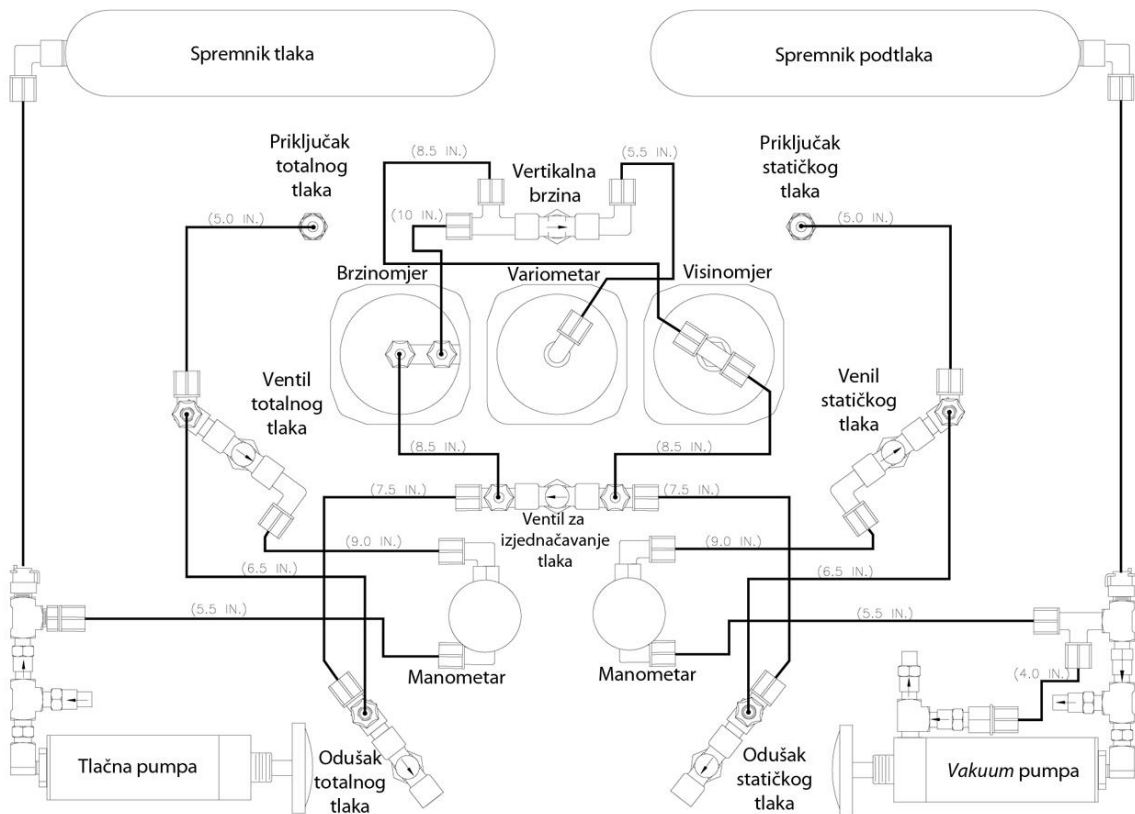
Dimenzije navedenog uređaja su 29 cm x 46 cm x 31 cm, mase je 8,2 kg, a oblikovan je tako da kada je zatvoren, ima oblik kompaktnog kofera radi lakšeg transporta i zaštite od vanjskih utjecaja. Ručnim ili eksternim pumpama (jedna za statički sustav, druga za pitot sustav) generira se tlak, odnosno podtlak, kontrolirajući vrijednost na manometrima, te se zatim skladišti u spremnicima. Preklopnim ventilima se spremnici povezuju s instrumentima na uređaju za ispitivanje, koji nam indiciraju brzinu i visinu kojima odgovara namješteni tlak i podtlak. Instrumenti su povezani vanjskim priključcima, preko kojih se uređaj za ispitivanje povezuje s pitot-statičkim sustavom zrakoplova. Pitot i statički vodovi unutar uređaja međusobno su povezani preko preklopnog ventila kako bi se mogao izjednačiti tlak u ta dva sustava, a ugrađeni su i po jedan ventil na svaki vod kako bi se mogao ispustiti tlak iz uređaja u atmosferu. Uređaj ima i mogućnost povezivanja na vanjske izvore tlaka, odnosno pumpe, čime se pojednostavljuje upotreba [12]. Na slici 8. prikazana je interna shema ispitnog uređaja, sa označenim sastavnim dijelovima.

Na prednjoj strani uređaja nalazi se kompenzacijska tablica (slika 9.), koja pokazuje odstupanja izmjere ispitnog uređaja od stvarne vrijednosti, te se može uočiti da su instrumenti, ugrađeni u ispitni uređaj, podložni histerezi² [12].

² Histereza – razlika u kalibraciji instrumenta ovisno o tome da li vrijednost raste ili pada, a uzrokovana je mehaničkim nesavršenostima unutar instrumenta [6].



Slika 7. Ispitni uređaj „Barfield“, model 1811GA



Slika 8. Interna shema ispitnog uređaja "Barfield", model 1811GA [12]

Manufacturer:		Type:		1811GA665					
Part No:		Serial No:		2147					
Altitude			Air Speed		Rate Of Climb				
Value (ft)	UP (ft)	DOWN (ft)	Value (kts)	up	Value (ft/min)	Climb	Descent		
-1000	-1000	----	20	20	500	460	450		
0	0	15	30	30	1000	950	970		
500	500	525	40	38	1500	1500	1450		
1000	1000	1030	50	48	2000	1950	1950		
1500	1500	1525	60	58	2500	2500	2500		
2000	2000	2030	70	69	3000	2920	2920		
3000	3000	3030	80	80	3500	3700	3700		
4000	4000	4030	90	90					
5000	5000	5035	100	100					
6000	6000	6035	110	110					
7000	7000	7040	120	120					
8000	8000	8035	130	130					
9000	9000	9030	140	140					
10 000	10000	10030	150	150					
12 000	11990	12030	160	161					
14 000	13990	14030	170	170					
16 000	15995	16035	180	180					
18 000	18005	18045	190	190					
20 000	20030	20060	200	200					
22 000	22035	22065	220	220					
25 000	25045	25075	240	240					
30 000	30060	30080							
35 000	35080	----							

Slika 9. Kompenzacijska tablica ispitnog uređaja

6. POSTUPAK ISPITIVANJA

Postupak ispitivanja može se podijeliti u tri faze: ispitivanje uređaja, ispitivanje pitot sustava i ispitivanje statičkog sustava.

6.1. ISPITIVANJE UREĐAJA

Svrha ove faze je provjera ispravnosti samog ispitnog uređaja, a vrši se tako da se zatvore svi ventili, zatim se napumpa tlak, odnosno podtlak, na predodređenu vrijednost, pa se nakon toga otvara ventil između spremnika i instrumenata na uređaju. U tom se trenutku provjerava pokazuje li brzinomjer unaprijed određenu vrijednost, pa se zatim ponovno zatvara ventil i kontrolira brzina istjecanja tlaka, koja ne smije biti veća od 2 čvora po minuti. Preklopnim ventilom između pitot i statičkog voda u uređaju oni se međusobno povezuju, te visinomjer u tome trenutku treba pokazati određenu vrijednost, a zatim se ponovno kontrolira istjecanje tlaka u trajanju od jedne minute. Ako su sve vrijednosti unutar parametara, uređaj je ispravan te se može nastaviti s ispitivanjem zrakoplova [12].

6.2. ISPITIVANJE PITOT SUSTAVA

Test započinje povezivanjem uređaja sa zrakoplovom, koje je izuzetno bitno kvalitetno napraviti iz razloga što naglo odspajanje vodova iz uređaja može poprilično oštetiti instrumentaciju zrakoplova. Nakon povezivanja, spremnik ispitnog uređaja puni se na određeni tlak, pa se postepenim otvaranjem ventila totalnog tlaka vrši ispitivanje. Povećavajući tlak, potrebno je uspoređivati indikaciju brzine ispitnog uređaja s brzinomjerom u zrakoplovu, te se bilježi razlika, koja se zatim kasnije prilaže kao tablica korekcije indikacije (naravno, ako je greška unutar granice), sve dok se ne dosegne vrijednost od 75% ukupnog područja indikacije

brzine u zrakoplovu. U tom se trenutku zatvara ventil i opet se kontrolira, gledajući oba brzinomjera, brzina istjecanja tlaka, koja ne smije biti veća od definirane vrijednosti. Prilikom završetka ispitivanja, tlak se mora postupno ispustiti kako se instrumenti ne bi oštetili [12].

6.3. ISPITIVANJE STATIČKOG SUSTAVA

Ispitivanje započinje kao i kod pitot sustava, ali je potrebno napraviti dodatan korak nakon povezivanja: otvaraju se ventili te se generira podtlak u sustavu određene vrijednosti, oba visinomjera se postavljaju na isti referentni tlak te se bilježi visina koju pokazuju. Nastavak ispitivanja vrši se tako da se generira dodatni podtlak, do mjere da visinomjeri pokazuju vrijednost za 1000 stopa više od prethodno zabilježene vrijednosti. Svi se ventili zatvaraju i promatra se, tijekom jedne minute, brzina propuštanja podtlaka, koja ne smije biti veća od definirane vrijednosti. Pri završetku ispitivanja, potrebno je postepeno vratiti tlakove na atmosfersku vrijednost [12].

7. ISPITIVANJE U PRAKSI NA ZRAKOPLOVU

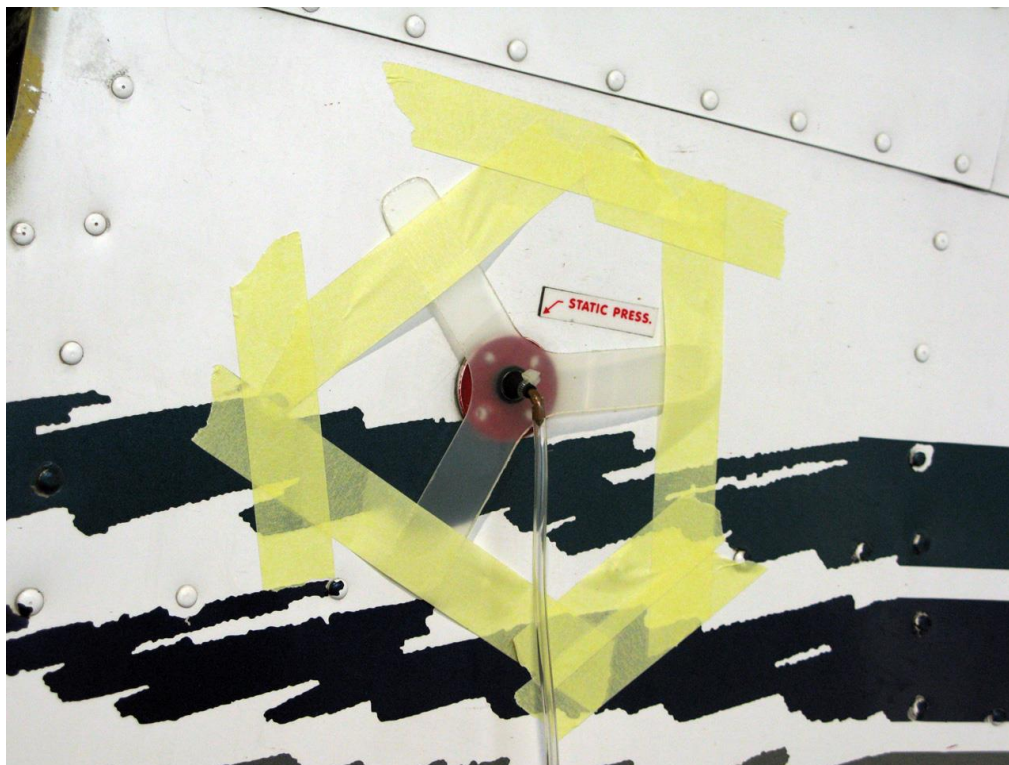
Zrakoplov na kojemu se provodilo ispitivanje u svrhu ovog završnog rada je Cessna 172R Fakulteta Prometnih Znanosti, registracije 9A-DAD, koja se koristi uglavnom za instrumentalne letove. Opremljena je s analognim instrumentima, s dodatnim visinomjerom, s grijanom pitot cijevi, te s alternativnim izvorom statičkog tlaka, kako bi bila podobna za instrumentalne operacije [6].

Iskustva u praksi su pokazala da je propisani postupak ispitivanja, opisan u prethodnom poglavlju, dovoljan za pouzdani rezultat, uz male izmjene, odnosno preinake samog postupka.

Budući da se ispitivanje vrši s ugašenim motorom zrakoplova, manifestira se histereza prikaza instrumenata, te ih je zbog toga potrebno lagano lupkati po staklu, kako bi dobili točnu indikaciju.

Povezivanje na statički sustav zrakoplova se vrši s adapterom u obliku tronošca (prikazan na slici 10.), koji se ljepljivim trakama učvrsti za trup, tako da se sredina poklopi sa statičkim otvorom. Unatoč tome, ponekad je problem ostvariti dovoljno sigurnu, odnosno hermetičnu vezu, te se u tom slučaju cijev statičkog sustava ispitnog uređaja spaja izravno na ventile za drenažu, čime se u potpunosti izbjegava povezivanje preko statičkog otvora na trupu.

Pitot cijev se povezuje kako je opisano u proceduri, ali je još potrebno začepiti njezine otvore za drenažu (prikazano na slici 11.), kako bi se ostvarila hermetičnost sustava.



Slika 10. "Tronožac" za ispitivanje



Slika 11. Pitot cijev pripremljena za ispitivanje


Povezujući ovo poglavlje sa prethodnim, moguće je opisati detaljan ispitni postupak na konkretnome zrakoplovu. Tijekom ispitivanja, potrebno je unositi izmjerene vrijednosti u dokument prikazan na slici 12.

Postupnik ispitivanja statičkog sustava je sljedeći:

- 1) Priprema zrakoplova (zatvaranje drenažnih otvora i montaža adaptera)
- 2) Povezati zrakoplov s ispitnom opremom
- 3) Generirati podtlak u ispitnoj opremi
- 4) Namjestiti visinomjer ispitne opreme i zrakoplova na isti referentni tlak od 1013.25 hPa
- 5) Očitati visinu aerodroma sa korigiranim barometarskim tlakom, te ju upisati u tablicu
- 6) Postupno otvarati ventil statičkog tlaka prema zrakoplovu, tako da instrumenti pokazuju visinu za 1000 ft veću od visine aerodroma
- 7) Zatvoriti ventil statičkog tlaka
- 8) Mjeriti 1 minutu, te nakon isteka vremena očitati i upisati u tablicu prikazanu visinu
- 9) Ako je promjena visine manja od 100 ft, statički sustav je ispravan
- 10) Postupno otvarati drenažni ventil, kako bi se ispustio podtlak iz sustava

Postupnik ispitivanja pitot sustava je sljedeći:

- 1) Priprema zrakoplova (zatvaranje drenažnih otvora i montaža adaptera)
- 2) Povezati zrakoplov s ispitnom opremom
- 3) Generirati nadtlak u ispitnoj opremi
- 4) Postupno otvarati ventil totalnog tlaka prema zrakoplovu, sve dok brzinomjeri ne prikažu vrijednost od 150 kn
- 5) Zatvoriti ventil totalnog tlaka
- 6) Mjeriti 1 minutu; nakon isteka vremena očitano brzinu upisati u tablicu
- 7) Ako je odstupanje unutar granice od 3% ili 5 kn, sustav je ispravan
- 8) Postupno otvarati drenažni ventil, kako bi se ispustio nadtlak iz sustava

 FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI-HZNS HR 145.015	AIRCRAFT SYSTEM TEST AND CHECK PITOT/STATIC LEAK TEST IAW EASA CS23.1325	Form: TL-05	Rev date: 03.09.2013.
		Rev: 1	A/C Reg:
		Atm. press:	A/C s/n:
		Temp:	A/C type:
1. ISPITIVANJE HERMETIČNOSTI STATIČKOG SUSTAVA			
Visina aerodroma sa korigiranim barometarskim tlakom (ft)	Visina aerodroma uvećana za oko 1000 (ft)	Očitavanje na visinomjeru nakon 1 minute	Dozvoljena promjena visine je 100 feet-a u minuti
2. ISPITIVANJE HERMETIČNOSTI PITOT SUSTAVA			
Zadana brzina (kt)	Očitana brzina nakon jedne minute (kt)	Dozvoljeno odstupanje je 3% ili 5 knots	
TEST SET:	S/N:	Calib. due date:	HZNS W/O
INSPECTED BY:	LOCATION:	DATE:	FINAL RESULT
			PASS FAIL

Slika 12. Dokument ispitivanja pitot-statičkog sustava

8. USPOREDBA IZMEĐU VELIKIH I MALIH ZRAKOPLOVA

Kada ih se usporedi, priprema i postupak ispitivanja pitot-statičkih sustava na malim i velikim zrakoplovima su praktički identični. Na obje vrste zrakoplova je potrebno začepiti sve drenažne otvore, te na siguran način povezati zrakoplov s ispitnim uređajem. Promjena tlakova ne smije biti nagla, niti iznosi i razlike tlakova smiju biti veći od određenih vrijednosti (koje zapravo korespondiraju izvan operativnog područja zrakoplova). Ispitne vrijednosti su veće na velikim zrakoplovima, kao i vremenski interval u kojem se mjeri odstupanje od početne vrijednosti. Dozvoljeno odstupanje je nešto veće na manjim zrakoplovima, budući da njihovi instrumenti nisu toliko precizni kao na velikim zrakoplovima [7,13]. U tablici 1. je napravljena usporedba vrijednosti ispitivanja između zrakoplova Airbus A320 (primjer velikog zrakoplova) i Diamond DV20 (primjer malog zrakoplova); uočljivo je da su granične vrijednosti na velikom zrakoplovu strogo definirane, te da je dozvoljeno odstupanje manje.

Tablica 1. Usporedba ispitivanja malog i velikog zrakoplova [7,13]

	Airbus A320	Diamond DV20
Max p	1050 hPa	Unutar operativnih granica
Min p	115 hPa	Unutar operativnih granica
Δp	6000 ft/min	Unutar operativnih granica
Max tot. p / stat. p	368 hPa	Unutar operativnih granica
Min tot. p / stat. p	Tot. nikad manji od stat.	Tot. nikad manji od stat.
Ispitna visina	10000 ft	1000 ft
Dozvoljeno odstupanje	Nakon 5 min: ± 275 ft	Nakon 1 min: ± 100 ft
Ispitna brzina	180 kn	150 kn
Dozvoljeno odstupanje	Nakon 5 min: ± 10 kn	Nakon 1 min: ± 10 kn

9. ZAKLJUČAK

Pitot-statički sustavi nisu komplicirani u svojoj izvedbi, ali njihova ispravnost je ključna za sigurnost leta. Njihova izloženost atmosferskim parametrima, budući da se njihova operacija temelji na tome, ih čini podobnima za kvarove uzrokovane vanjskim faktorom. Utjecaj turbulencija se može zanemariti obzirom na izmjeru, a zaleđivanje je spriječeno korištenjem grijača.

Pitot-statički sustav je, kao i sve sustave zrakoplova, potrebno periodički pregledavati, kako bi se provjerilo da nije došlo do začepljenja, te ispitivati sustav na propuštanje tlaka, odnosno prekontrolirati točnost izmjere. Sam postupak ispitivanja nije kompliciran i može se reći da je identičan na malim i velikim zrakoplovima, ali ključno je poštovati njihovu osjetljivost, stoga je potrebno postupno mijenjati ispitne tlakove, kao i paziti da se ne prekorače maksimalne, odnosno minimalne vrijednosti. Unatoč popriličnoj razlici u prikazima, odnosno instrumentima, između malog i velikog zrakoplova, suštinska razlika između njihovih pitot-statičkih sustava je mala. Veliki zrakoplovi, naravno, imaju bolje performanse, te sama izmjera korespondira širokom rasponu brzina, ali i uvjeta u kojima lete. Potrebno je naglasiti i veću redundanciju njihovih sustava, stoga se ugrađuju dva ili čak tri potpuno neovisna pitot-statička sustava. Njihova izmjera se kontinuirano komparira u računalima, koja upozoravaju pilota u slučaju razlike u izmjeri koja prelazi neku granicu.

Ispitna oprema je izrađena da bude kompaktna, prijenosna, te jednostavna za korištenje. Sadrži umanjeni pitot-statički sustav, koji je tvornički kalibriran, te služi kao referenca za sustav koji se nalazi u zrakoplovu. Zbog malog volumena pitot-statičkog sustava, izvedbe ispitne opreme s ručnim pumpama su dovoljno praktične za potrebe povremenog ispitivanja. Prilikom očitavanja instrumenata tokom ispitivanja, potrebno je voditi računa o pojavi histereze izmjere.

Postupak ispitivanja nije zahtjevan, te se, pojednostavljeno, svodi na generiranje referentnih tlakova u pitot-statičkom sustavu zrakoplova, uz pomoć ispitne opreme. Kontrolira se koliko čitavi sustav propušta zrak, te da li odstupanje, odnosno propuštanje, spada u prihvatljive granice, koje se obično izražavaju kao gubitak brzine, odnosno dobitak visine, u jedinici vremena. Veliki zrakoplovi imaju preciznije pitot-statičke sustave, pa su samim time i dozvoljena odstupanja manje tolerancije, u usporedbi s malim zrakoplovima.

LITERATURA

- [1] <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/pitot.html>, učitano 20.03.2019.
- [2] S.R. Technics, Basic Maintenance Training Manual, Switzerland, 2004.
- [3] Jeppesen, JAA ATPL Training – Instrumentation, 2007.
- [4] U.S. Department of Transportation, FAA: Airframe & powerplant mechanics – airframe handbook, Jeppesen Sanderson training products, 1972.
- [5] Dynon Avionics; AOA, Pitot, Static Plumbing Kit Installation Guide, September, 2019.
- [6] European Aviation Safety Agency, Certification Specifications for Normal, Utility, Aerobatic, and Commuter Category Aeroplanes CS-23, 2003.
- [7] Diamond Aircraft Industries, DV 20 E AIRPLANE MAINTENANCE MANUAL, Austria, 2016.
- [8] Flight Safety Canada, Dash 8 Q400 Maintenance Training Manual, 2001.
- [9] Jeppesen, JAA ATPL Training – Principles of Flight, 2001.
- [10] Flight Safety Canada, Dash 8 Q400 Maintenance Schematics Manual, 2001.
- [11] Diamond Aircraft Industries GmbH, DV20 Airplane Flight Manual, Austria, 1999.
- [12] Barfield Inc., 1811GA (SERIES) Pitot-static Test Set User Instruction Manual, U.S.A., 2014.
- [13] Airbus S.A.S., A320 Aircraft Maintenance Manual, France, 2002.

POPIS SLIKA

Slika 1. Poprečni presjek pitot-statičke cijevi

Slika 2. Pitot cijev zrakoplova Airbus A320

Slika 3. Statički otvori zrakoplova Airbus A320

Slika 4. Pitot-statički sustav zrakoplova DV-20

Slika 5. Pitot cijev zrakoplova Dash 8 Q400

Slika 6. Pitot-statički sustav i ADC-ovi

Slika 7. Ispitni uređaj „Barfield“, model 1811GA

Slika 8. Interna shema ispitnog uređaja "Barfield", model 1811GA

Slika 9. Kompenzacijska tablica ispitnog uređaja

Slika 10. "Tronožac" za ispitivanje

Slika 11. Pitot cijev pripremljena za ispitivanje

Slika 12. Dokument ispitivanja pitot-statičkog sustava

POPIS TABLICA

Tablica 1. Usporedba ispitivanja malog i velikog zrakoplova

POPIS KRATICA

ADC – Air Data Computer



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
10000 Zagreb
Vukelićeva 4

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je ovaj _____ završni rad

isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu što pokazuju korištene bilješke i bibliografija.

Izjavljujem kako nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, niti je prepisan iz necitiranog rada, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava.

Izjavljujem također, kako nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu _____ završnog rada
pod naslovom **Postupci i metode ispitivanja Pitot-statičkog sustava zrakoplova**

na internetskim stranicama i repozitoriju Fakulteta prometnih znanosti, Digitalnom akademskom repozitoriju (DAR) pri Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu.

Student/ica:

U Zagrebu, 2.9.2019

(potpis)