Projektiranje mjernog sustava za umjeravanje visinomjera

Božan, Domagoj

Undergraduate thesis / Završni rad

2015

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:085790

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Domagoj Božan

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori: Student:

Prof.dr. sc. Lovorka Grgec Bermanec Domagoj Božan

Zagreb, 2015.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentorici Prof.dr.sc. Lovorki Grgec Bermance i stručnom suradniku gospodinu Jošku Zelku na pomoći prilikom izrade završnog rada.

Domagoj Božan

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija zrakoplovstva

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum: 17 -09- 2015	Prilog
Klasa: 602-04/15-6/3	
Ur.broj: 15-11-03-15-337	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Domagoj Božan** Mat. Br.:0035184908

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Projektiranje mjernog sustava za umjeravanje visinomjera**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Design of measuring system for calibration of altimeters**

Opis zadatka:

U ovom radu potrebno je projektirati mjerni sustav za sljedivo umjeravanje barometarskih visinomjera korištenjem apsolutne tlačne vage kao etalona. U radu koristiti postojeću mjernu opremu Laboratorija za procesna mjerenja.

Potrebno je izraditi:

- Pregled metoda mjerenja visine zrakoplova
- Pregled međunarodnih normi i uputa za umjeravanje visinomjera
- Opis i skice mjernog sustava za usporedbeno umjeravanje
- Opis postupka umjeravanja i procjene mjerne nesigurnosti
- Provesti mjerenja na postojećoj mjernoj liniji u Laboratoriju za procesna mjerenja
- Obraditi rezultate umjeravanja

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
25. studenog 2014.

Rok predaje rada:
1. rok: 26. veljače 2015.
2. rok: 17. rujna 2015.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 2., 3., i 4 . ožujka 2015.
2. rok: 21., 22., i 23. rujna 2015.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Lovorka Grgec Bermanec

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivica Smojver

SADRŽAJ

SADRŽAJ I
POPIS SLIKA III
POPIS TABLICA IV
POPIS OZNAKA V
SAŽETAK VII
SUMMARY VIII
1. UVOD 1
2.NAČINI MJERENJA VISINE 2
2.1.Vrste visinomjera 2
2.2.Barometarski visinomjer 2
2.2.1. Grubi (barometarski) visinomjer 4
2.2.2. Osjetljivi visinomjeri 7
2.2.3. Barografi 8
2.3. Valni visinomjeri 8
2.3.1. Zvučni visinomjer 9
2.3.2. Radiovisinomjer 9
2.3.3. Radar-visinomjer 10
2.4. Mjerne pogreške kod barometarskog visinomjera 10
3.MJERNI SUSTAV ZA USPOREDBENO UMJERAVANJE 12
3.1. Mjerenje tlaka 12
3.2. Tlačna vaga 12
3.3. Vrste tlačnih vaga 14
3.3.1. Plinska tlačna vaga 15
3.4. Mjerna linija 16
3.4.1. Etalonska tlačna vaga 16
3.4.2. Visinomjer VD-10 17
3.5. Mjerna nesigurnost 17

3.6. Priprema za mjerenje.....18

4. LABORATORIJSKA MJERENJA.....20

4.1 Postupak mjerenja.....21

4.2.Rezultati mjerenja.....22

5. PROCJENA MJERNE NESIGURNOSTI.....25

6. ZAKLJUČAK.....31

LITERATURA.....32

POPIS SLIKA

Slika 1. Dijagram promjene tlaka s visinom u standardnoj atmosferi.....4

Slika 2. Barometarski visinomjer s podjelom u metrima.....5

Slika 3. Aneroidna kapsula.....6

Slika 4. Model barometarskog visinomjera.....6

Slika 5. Skica osjetljivog visinomjera.....7

Slika 6. Skica barografa.....8

Slika 7. Princip rada radiovisinomjera.....10

Slika 8. Načini mjerenja tlaka.....12

Slika 9. Sklop tlačne vage.....13

Slika 10. Shema mjerne linije.....16

Slika 11. Mjerna linija LPM-a.....17

Slika 12. Prikaz razlike ispitivanog mjerila i etalona.....24

Slika 13. Iznos odstupanja i mjerna nesigurnost.....30

POPIS TABLICA

Tablica 1. Opadanje atmosferskog tlaka, temperature i gustoće zraka u standardnoj atmosferi....3

Tablica 2. Osnovni podaci o etalonskoj vagi.....16

Tablica 3. Odnos visine i barometarskog tlaka.....19

Tablica 4. Dodatne mase korištene na tlačnoj vazi.....21

Tablica 5. Rezultati laboratorijskog mjerenja.....22

Tablica 6. Razlika u pokazivanju mjernog instrumenta.....23

Tablica 7. Mjerne nesigurnosti po ispitnim točkama.....27

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
p	Pa	Tlak
p_0	Pa	Atmosferski tlak
H	m	Nadmorska visina
t	°C	Temperatura zraka
F	N	Sila na klip tlačne vage
A_e	m^2	Efektivna površina tlačne vage
λ	Mpa^{-1}	Koeficijent distorzije
v	m^3	Volumen za korekciju
g	m/s^2	Gravitacijsko ubrzanje
Γ	m	Opseg klipa tlačne vage
$\alpha p+c$	$°C^{-1}$	Koeficijent temperaturne ekspanzije
k	-	Faktor pokrivanja
m	kg	Dodana masa
H_1	m	Visina pokazivanja ispitivanog mjerila
ΔH	m	Razlika pokazivanja
U	-	Ukupna mjerna nesigurnost
U_e	-	Mjerna nesigurnost etalona
U_r	-	Mjerna nesigurnost ispitivanog mjerila
U_h	-	Mjerna nesigurnost uslijed histereze
p_e	bar	Efektivni iznos tlaka generiran na sklopu
m_{pi}	kg	Realna i-tog utega postavljenog na sklop
ρ_a	kg/m^3	Gustoća zraka okoline
ρ_{mpi}	kg/m^3	Gustoća i-tog utega
ρ_{N2}	kg/m^3	Gustoća radnog medija
α_{KP}	$°C^{-1}$	Koeficijent temperaturnog rastezanja klipa
α_{CP}	$°C^{-1}$	Koeficijent temperaturnog rastezanja cilindra
A_{0P}	m^2	Efektivna površina sklopa pri nultom tlaku

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
t_p	°C	Temperature sklopa za vrijeme ispitivanja
θ_p	°	Kut nagiba osi klipa u odnosu na vertikalu
v_p	m^3	Volumen za koji se radi korekcija zbog uzgonskog djelovanja
h	m	Razlika visina etalonskog i ispitivanog sklopa

SAŽETAK

Tema rada je Projektiranje mjernog sustava za umjeravanje visinomjera. Visinomjer je barometarski što znači da radi na principu promjene statičkog tlaka. Navedeni su različiti načini mjerenja visine kod zrakoplova, te navedeni nedostaci kod barometarskog visinomjera. Također je dan detaljan opis barometarskog visinomjera. Navedeni su instrumenti i etaloni koji su korišteni pri izradi ovog rada. Naveden je detaljan opis etalonske tlačne vage koja je korištena za umjeravanje. Postupak umjeravanja i mjerna linija su također detaljno objašnjeni (postupak spajanja mjerne linije, provedba mjerenja). Prikazana je veza između promjene visine i statičkog tlaka. Na kraju rada prikazani su podaci umjeravanja, te mjerna nesigurnost.

Ključne riječi: barometarski visinomjer, tlačna vaga, mjerenje tlaka, veza tlaka i visine, mjerna nesigurnost

SUMMARY

The subject of this thesis is Design of measuring system for calibration of altimeters. Altimeter is barometric which means it works on principe of change of static pressure.There are listed different ways of measuring height in the aircraft and also listed shortcomings of barometric altimeter. In this thesis also is provided a detailed description of barometric altimeter. There are listed the instruments and standards that are used in the preparation of this work. There is a detailed description of the reference pressure piston gauge that is used for calibration. The process of calibration and measurment line are also explained in detail (installation of measurment line, the implementation of measurment). The relation between height changes and static pressure are also shown. At the end of the thesis are represented data of calibration, and measurement uncertainty.

Keywords: barometric altimeter, pressure piston gauge, relation between height an pressure, measurement uncertainty

1. UVOD

Od prvih letova braće Wright pa do kraja Prvog svjetskog rata instrumenti su imali podređenu ulogu, tada se letjelo „po osjećaju“, a tahometar i altimetar su bili glavni, često jedini instrumenti na zrakoplovu. Teoriju letenja „po osjećaju“ dugo su smatrali ispravnom. Međutim s razvojem zrakoplovstva sve se više primjećivao nedostatak ljudskih osjetila. Zrakoplov kao prijevozno sredstvo moralo je letjeti po svim vremenskim uvjetima, tj. po magli i po noći letenje po osjećaju nije moglo zadovoljiti ovaj zahtjev, jer ljudska osjetila više nisu bila dovoljna, nego su često pilote dovodili do zablude. Brzo su shvatili da bez dobre vidljivosti se ne može letjeti po osjećaju, već po instrumentima.

Poslije Prvog svjetskog rata vremenom su stvoreni, usavršavani mnogi drugi instrumenti koji ne služe samo za mjerenje pojedinih veličina kojima se kontrolira rad motora ili zrakoplova, već i za određivanje položaja zrakoplova u odnosu na zemlju. Uvođenjem zrakoplovnih instrumenata sama sigurnost putovanja se uvelike povećala. S obzirom na mnoge veličine koje instrumenti na suvremenim zrakoplovima moraju izmjeriti i mnoge položaje koje zrakoplov, kao tijelo koje se slobodno kreće kroz trodimenzionalan prostor, može zauzeti razumljivo je da su zrakoplovni instrumenti mnogobrojni i kompliciran. Napredak u zrakoplovstvu ide usporedno sa složenošću, stoga je i sve teži zadatak posade, koja mora poznavati i pravilno koristiti sve te mnogobrojne uređaje, jer bez tog nema sigurnog letenja. Prema tome instrumenti i radio uređaji su uvelike omogućili da se zrakoplov ne koristi samo u sportke i vojne svrhe već postane prometno sredstvo modernog doba.

Jedan od važnijih instrumenata u zrakoplovu je visinomjer. Razvojem zrakoplovstva i povećanjem visine leta došlo se do zaključka da je potrebno u svakom trenutku poznavati trenutnu visinu na kojoj zrakoplov leti. Godine 1937. Royal Air Force (RAF) odabire šest osnovnih instrumenata koji se moraju naći u pilotskoj kabini: brzinomjer, visinomjer, variometar, pokazivač skretanja i klizanja, magnetski kompas i umjetni horizont. To pravilo vrijedi do današnjeg dana uz sitne promjene.

U početku su to bili grubi visinomjeri s značajnim greškama pri pokazivanju visine, međutim modernizacijom se uvelike povećala točnost samih visinomjera iako neki od primitivnih visinomjera se i danas koriste u malim zrakoplovima.

2. NAČINI MJERENJA VISINE

2.1.Vrste visinomjera

Visinomjeri su zrakoplovni instrumenti pomoću kojih se dobije informacija na kojoj visini se nalazi zrakoplov u određenom trenutku. Postoje dvije visine koje su značajne za pilota:

- Relativna visina: visina nad terenom preko kojeg se leti
- Apsolutna visina: nadmorska visina

Visinomjere možemo podijeliti na dvije vrste[1]:

1. Barometarske
2. Valne

Barometarske visinomjere dijelimo na[1] :

- Grube
- Osjetljive
- Barografe

Valne visinomjere dijelimo na[1]:

- Zvučne
- Radiovisinomjere
- Radar-visinomjer

2.2. Barometarski visinomjer

Barometarski visinomjeri rade na principu mjerenja statičkog tlaka zraka kroz koji se zrakoplov kreće. To je najstariji i najviše primjenjen način mjerenja visine leta. Ovi visinomjeri predstavljaju aneroidne (suhe) barometre čija je skala, u skladu s tim da se promjenom visine mijenja i tlak zraka, tako podijeljena da se na njoj visine neposredno očitavaju. Barometarska metoda mjerenja visine ne daje veliku točnost, jer tlak zraka na nekoj određenoj visini nije uvijek isti. Zbog takvih uvjeta došlo se do zaključka da je potrebno odrediti standardne uvjete pri kojima će se vršiti umjeravanje instrumenata i usvojiti da se atmosferski tlak i temperatura mijenjaju s visinom. Od 1923. godine u svim zemljama visinomjeri se umjeravaju prema tzv. standardnoj atmosferi.

Zakon opadanja tlaka s visinom nije kontinuiran, već za visine do 11000 m tlak se izračunava prema formuli[2]:

$$p=p_0(1-0,0\ 000226H)^{5.255} \qquad (2.1)$$

dok se za visine preko 11000 m, gdje je pretpostavljena nepromjenjiva temperatura zraka od -56.5 °C, koristi se formula[2]:

$$\log\frac{p_{11}}{p} = \frac{H - 11000}{14600} \qquad (2.2)$$

Zakon opadanja temperature, počevši od usvojene normalne temperature na nadmorskoj visini 0 m t_0=15°C, glasi[2]:

$$t=15-0{,}00652H \qquad \text{za H < 11000 m} \qquad (2.3)$$

odnosno[2]:

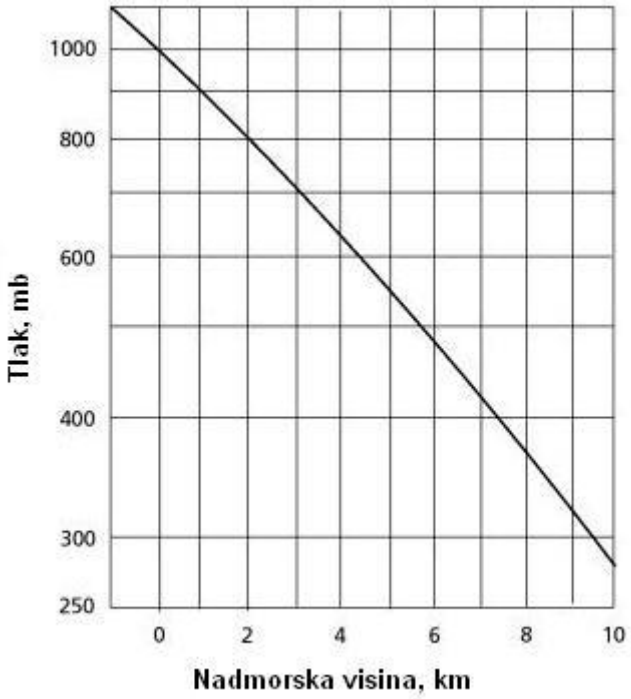
$$t=-56{,}5°C \qquad \text{za H >11000 m}$$

Tablica 1: Opadanje atmosferskog tlaka, temperature i gustoće zraka u standardnoj atmosferi[2]

Visina (m)	Temperatura (℃)	Tlak (mmHg)	Gustoća zraka (kg/m^3)
0	15	760	1,225
500	11,75	715,9	1,1671
1000	8,5	674,1	1,1117
1500	5,25	634,2	1,0581
2000	2	596,2	1,0064
2500	-1,25	560,1	0,9567
3000	-4,5	525,8	0,9091
3500	-7,75	493,2	0,8631
4000	-11	462,3	0,819
4500	-14,25	432,9	0,7767
5000	-17,50	405,1	0,7360
5500	-20,75	378,7	0,6969
6000	-24	353,7	0,6595
6500	-27,25	330,2	0,6237
7000	-30,5	307,9	0,5894
7500	-33,75	286,8	0,5565
8000	-37	266,9	0,5250
8500	-40,25	248,2	0,4949
9000	-43,5	230,4	0,4661
9500	-46,75	213,8	0,4387

10000	-50	198,2	0,4125
10500	-53,25	183,4	0,3875
11000	-56,5	169,6	0,3637

Iz prikazanih podataka u Tablici 1. za standardnu atmosferu dobije se krivulja *p=f(H)*, tj. opadanje tlaka s visinom.



Slika 1. Dijagram promjene tlaka s visinom u standardnoj atmosferi[3]

Iz zakona o opadanju tlaka s visinom u standardnoj atmosferi proizlazi da mehanizam visinomjera mora biti takav, da se njime približno logaritamsko opadanje tlaka pretvori u linearno, kako bi se dobila ravnomjerna podjela skale.

2.2.1. Grubi (barometarski) visinomjer

Ovakvi visinomjeri predstavljaju aneroidne barometre, kod kojih je skala podijeljena na kilometre visine. Aneroidni barometri su barometri s kapsulom iz koje je izvučen zrak. Pri promjenama tlaka zraka kapsula se širi i skuplja tj. kada tlak opada kapsula se širi, i obrnuto kad se tlak povećava kapsula se skuplja. Pošto svakom tlaku odgovara određena visina, skala se dijele na jedinice visine i time se barometar pretvara u visinomjer.

Barometarski visinomjer služi za mjerenje visine pomoću promjene statičkog tlaka koji se mijenja sa visinom. Statički tlak se dovodi kroz instalaciju statičkog tlaka u kućište instrumenta. Kućište zbog toga mora biti hermetizirano kako na tlak u njemu nebi utjecao tlak koji je u prostoru gdje je

smješten instrument. Statički tlak se pretvara u pomak preko aneroidnih kapsula koje se komprimiraju pri porastu tlaka, a šire pri njegovom smanjivanju.

Podešen je na ICAO (*International Civil Aviation Organization*) standardni način kada njegova ljestvica za početni barometarski tlak pokazuje p_0 = 101325 Pa. Koriste se za visine do 20 km. [1]



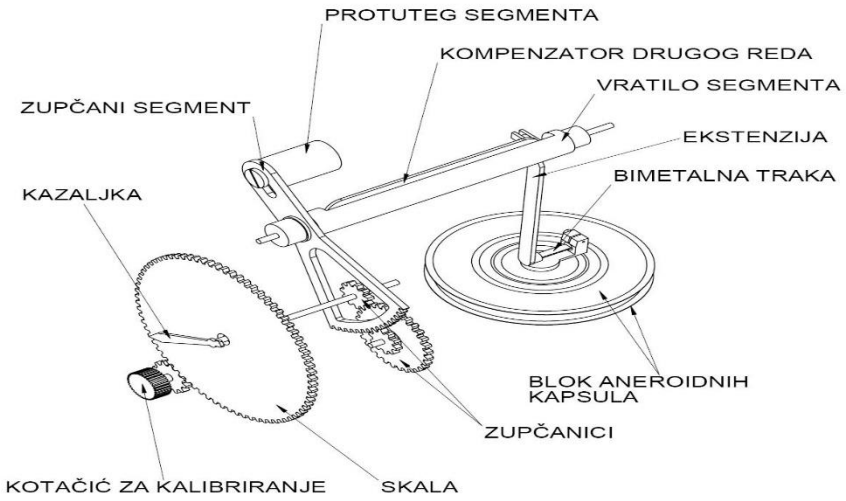
Slika 2. Barometarski visinomjer s podjelom u metrima

Aneroidna kapsula[3] se sastoji od dvije dijafragme koje su zavarene ili zalemljenje po obodu jedna uz drugu. Unutar kapsule je tehnički vakuum koji iznosi 26 Pa[4]. Zbog tako niskog tlaka unutar kapsule se nalazi opruga koja sprječava potpuno stlačivanje pri velikim tlakovima. Postoje dvije vrste izvedbi dijafragmi, ravna i valovita. Pokusima je utvrđeno kako valovita pruža bolju linearnost i preciznost pri većim tlakovima, te se zbog toga valovita dijafragma koristi kod barometarskih visinomjera. Također se zbog povećanja preciznosti kapsule spajaju u slogove (tzv. ″baterije″). Materijali koji se koriste za izradu kapsula su fosforna ili berilijeva bronca, srebro, monel, čelik itd. Debljina stijenke dijafragmi iznosi od 0,05 do 2 mm[4]. U sredini se nalazi kruti centar preko kojeg se ili spaja na drugu kapsulu ili povezuje s ekstenzijom. Spajanje s drugom kapsulom je navojno, kao i spoj s tvrdom podlogom.



Slika 3. Aneroidna kapsula

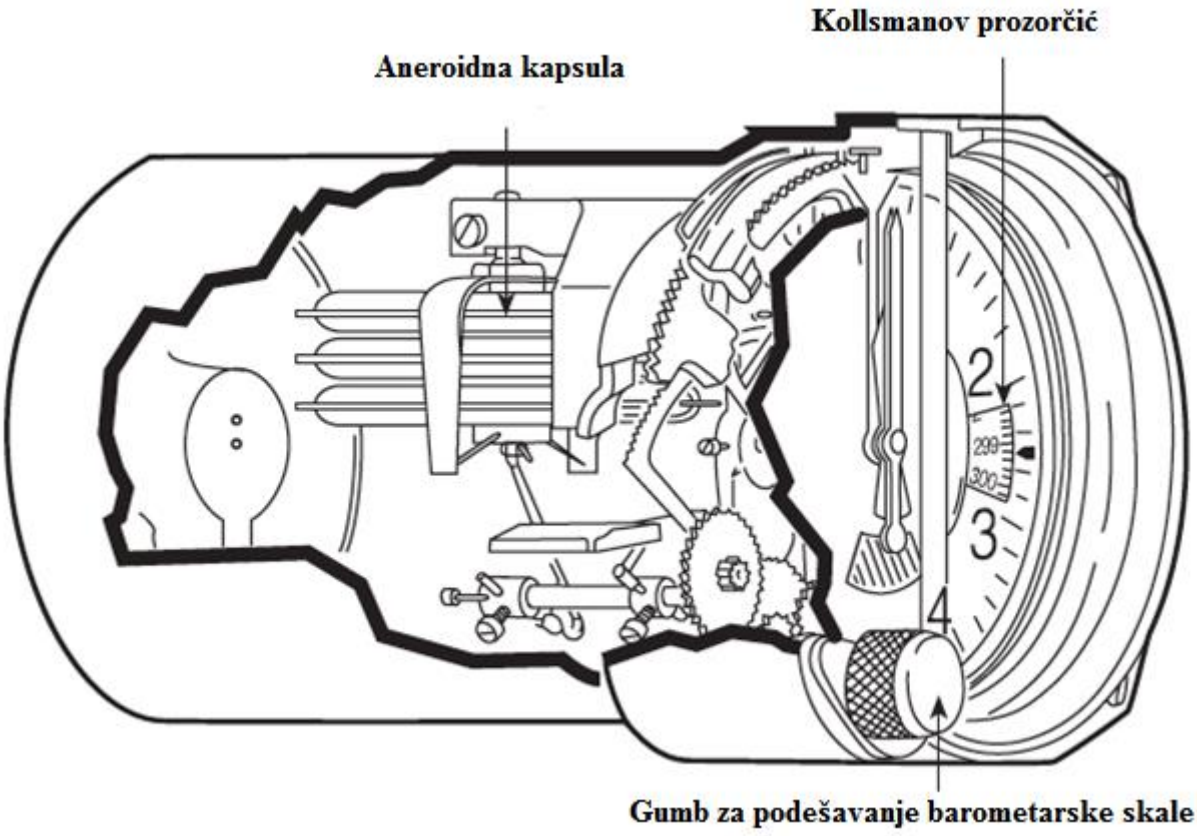
Kao što je rečeno glavni sastavni dio visinomjera je blok aneroidnih kapsula. Pri penjanju zrakoplova ona se uslijed opadanja tlaka širi i preko ekstenzije okreće vratilo (mehanizam s zglobovima); zupčani segment čvrsto je spojen s vratilom, te se pri tome i on okreće; s malim zupčanikom on daje potrebnu multiplikaciju za pokretanje kazaljke, postavljene na zajedničko vratilo s zupčanikom. Bimetalne trake služe za temperaturnu kompenzaciju grešaka. Zbog postavljanja kazaljke na 0 brojčanik je po obodu nazubljen i pomoću kotačića na prednjoj strani instrumenta može se okretati u odnosu na mehanizam i kutiju. Podjela na brojčaniku izvšena je na kilometre visine. Hermetična kutija preko priključka je spojena sa statičkim vodom Pito-cijevi, kako bi na kapsulu djelovao stvarni tlak zraka koji vlada na određenoj visini.



Slika 4. Model barometarskog visinomjera

2.2.2. Osjetljivi visinomjer

Skala grubog visinomjera ne dozvoljava točno čitanje visine, svaki dio predstavlja 20 ili više metara, što je za slijetanje bez dobre vidljivosti suviše grubo. Upotrebom visinomjera sa dvije ili više kazaljki dužina skale praktično se povećava 10 puta te se za toliko i povećava točnost očitanja visine[1].

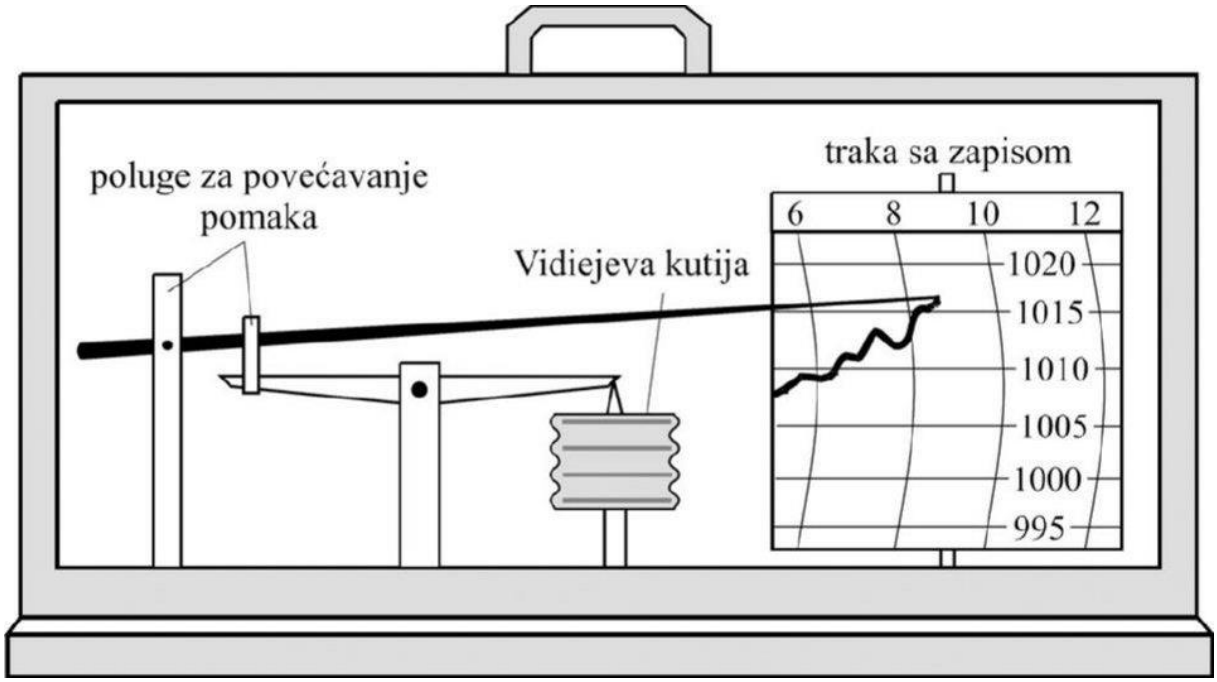


Slika 5. Skica osjetljivog visinomjera

Pri penjaju zrakoplova višestruka aneroidna kapsulaa se širi i preko poluga okreće vratilo. Zupčani segment je čvrsto nasađen na vratilo i uzubljen je s zupčanikom. Preko zupčanika okretanje se prenosi na veliku kazaljku, a preko reduktora i šuplje osovine na malu kazaljku. Povećanjem broja kapsula se dobije veći ukupan hod, te se time povećava točnost instrumenta. Temperaturna kompenzacija je izvedena bimetalnim trakama. Prozorčić sa desne strane naziva se Kollsmanovim prozorom i prikazuje trenutni tlak u [inHg] (inč živina stupca, 1 inHg = 3386 Pa). Taj tlak se namješta pomoću dugmeta i služi za korigiranje nultog položaja. Pri letenju iznad planina tlak se postavlja na onaj koji odgovara nadmorskoj visini 0, tako da pokazivanje instrumenta može u svakom trenutku se usporediti s visinama na geografskim kartama. Pri spuštanju na slijetnu stazu koja leži više ili niže od polazne staze, na prozorčiću se namješta tlak koji vlada na mjestu slijetanja.

2.2.3. Barografi

Barografi[5] su visinomjeri koji služe za bilježenje visine leta. Mehanizam ne pokreće kazaljka, kao što je to slučaj kod prije opisanih visinomjera, nego pero ili vrh koji na traci bilježi visinu leta. Glavni dio barografa je baterija kapsula. Prednosti su iste kao kod gore navedenog visinomjera. Deformacija kapsule se prenosi preko nekoliko poluga na pisaljku, koja klizi po barogramu, omotanom oko bubnja. Bubanj se okreće stalnom brzinom pomoću satnog mehanizma. Brzina okretanja je različita i ovisi za kakva je mjerenja barograf predviđen. Barografi se izrađuju za razne visine. On također mora biti hermetički zatvoren da bi mogao pokazivat točan atmosferski tlak ili se ugrađuje posebna kapsula, koja se spaja sa statičkim vodom Pito-cijevi i svojim deformacijama ispravlja eventualnu grešku.



Slika 6. Skica barografa

2.3. Valni visinomjeri

To su visinomjeri koji mjere stvarnu visinu zrakoplova iznad terena koji se prelijeće. Za razliku od barometarskog visinomjera, valni dozvoljava mjerenje visine iznad svakog terena i nezavisno od obavijesti s zemlje. Pri tome se najviše primjenjuje princip odbijanja valova (zvučnih ili radio valova). Visina se dobije iz vremena koje protekne od trenutka polaska do trenutka povratka odbijenog vala u prijemnik visinomjera.

2.3.1. Zvučni visinomjeri

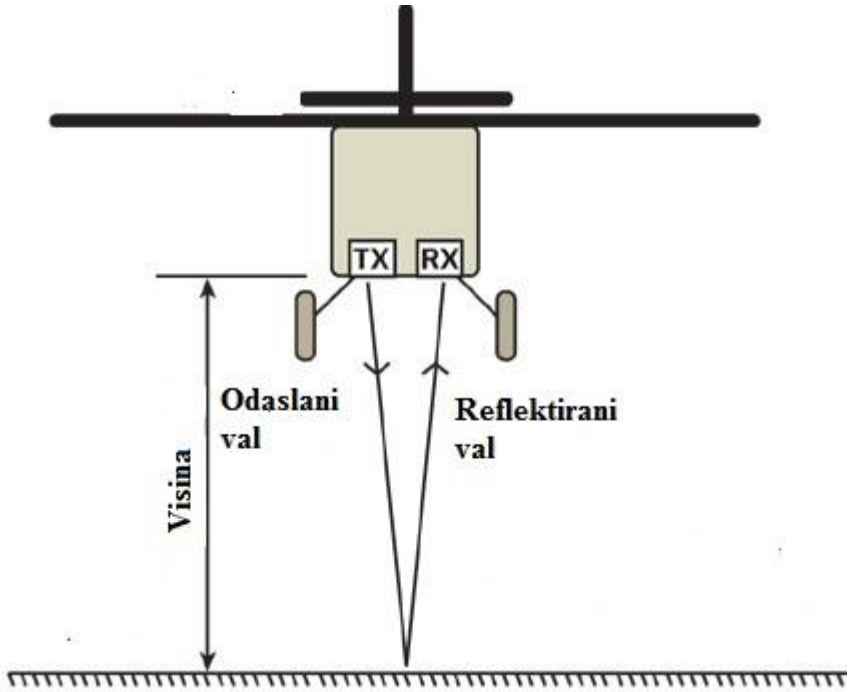
Ovaj uređaj služi za akustično mjerenje visine leta. Koristan je pri slijetanju bez dobre vidljivosti, ako je tlak zraka nestalan jer promjena od 1mmHg odgovara visini od 11m[1]. Zvučni visinomjer je nezavisan od atmosferskog tlaka, te je stoga pogodan upravo za one uvjete uporabe pri kojima visinomjer s dvije kazaljke nije dovoljno pouzdan. Domet zvučnog visinomjera ovisi od buke motora i prirode zemljišta nad kojim se leti. Odbijanje zvuka najbolje je iznad vode i ravnih površina. Međutim koristi se za male visine, najviše do 500 m[1]. Kako se mjeri vrijeme zvučnog signala zbog malih visina to iznosi desetinke sekundi. Radi na principu odbijanja zvučnih valova od površine zenlje i njihovog prijema nazad u prijemnik zrakoplova. Sastavni dijelovi su[1]:

1.Izvor zvuka

2.Uređaj koji mjeri vremenski interval između emisije zvuka i prijema

2.3.2. Radiovisinomjer

Upotreba zvučnog visinomjera ograničena je bukom motora i elise, koja na visini od nekoliko stotina metara nadjačava odjek te brzinom aviona. Brzina suvremenih putničkih zrakoplova je blizu brzine zvuka, tako da u vremenskom intervalu od emisije zvuka do povratka odjeka zrakoplov prijeđe više stotina metara te se za to vrijeme konfiguracija terena može znatno promijeniti. Stoga se pribjegava upotrebi radiovisinomjera, koji koristi odbijanje elektromagnetskih valova. Njihova brzina (300 000 km/s) [1] tako je velika, da se odbijeni valovi takoreći vrate u istom trenutku; vemenski interval za visine od nekoliko stotina metara izražava se u milijuntnim dijelovima sekunde, što predstavlja problem mjerenja vremena. Princip rada je vrlo jednostavan u teoriji. Odašiljač na zrakoplovu šalje prema zemlji signale, čija se vrlo visoka učestalost vremenski mijenja u određenom odnosu. Pošto se signal odbio od zemlje i vratio do zrakoplova, učestalost odašiljača se promijenila i sada se razlikuje od učestalosti odjeka odbijenih valova. Razlika učestalosti mjeri se u prijemniku, kako je ona srazmjerna vremenu tj. visini, skala mjerača učestalosti može se podijeliti neposredno na metre visine.



Slika 7. Princip rada radiovisinomjera

Tx – odašiljač signala

Rx – prijemnik (antena)

2.3.3. Radar-visinomjer

Princip rada ovih visinomjera u osnovu je isti kao kod radiovisinomjera. Radar odašiljač šalje impulse prema zemlji, antena prima odbijene valove, a uređaj mjeri proteklo vrijeme i u ovisnosti o njegovoj dužini pokazuje neposredno visinu leta. Kako se radar impulsi mogu usmjeriti u određeni pravac, to se radar-visinomjerom može ispitivati teren ne samo ispod, već i ispred zrakoplova. Na taj način se povećava sigurnost leta u pogledu sudara zrakoplova.

2.4. Mjerne pogreške kod barometarskog visinomjera

Mjerne pogreške se javljaju zbog izvedbe pojedinih dijelova te zbog načela na kojima se temelji mjerenje.

Pogreške koje nastaju su uzrokovane od[1]:

1) **Statičkog tlaka**
   - nastaju zbog razlike između ICAO standardne i stvarne atmosfere
     - uzroci su razlike u početnome i standardnome tlaku
     - pogreške se mogu ispraviti samo na manjim visinama
     - uklanjaju se uporabom korigiranoga visinomjera
   - nastaju zbog razlike između ICAO standardne i stvarne temperature

- odstupanje od standardne temperature na nekoj visini uzrokuje lažna javljanja na kazaljci visinomjera

2) Mehaničkih pogrešaka

- rastu s visinom leta zbog smanjivanja barometarskog gradijenta
- nastaju zbog:
  - tehnoloških odstupanja u izradi membranskih kutija
  - mehaničke histereze (uzroci su nesavršenosti elastičnih svojstava materijala)
  - trenja (u zupčanicima, ležajevima i ostalim dijelovima mehaničkog prijenosa) – uzrokuje skokovito prikazivanje kazaljke
  - utjecaja temperature na mehanizam – promjenom temperature mijenja se modul elastičnosti i dimenzije mehaničkih dijelova; kompenzira se bimetalnim oprugama i polugama
  - mrtvoga hoda (zračnosti zupčanika)
  - nedovoljne uravnoteženosti kazaljki (dodaju se protuutezi)

3) Temperaturne promjene

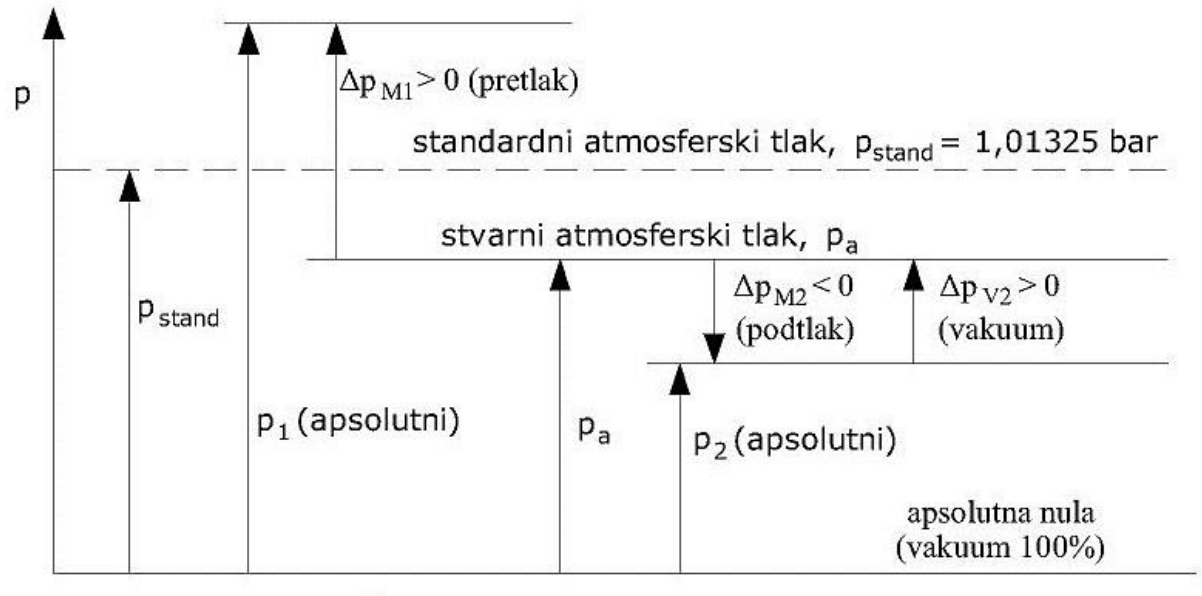
- Izazvale bi znatne greške uslijed promjene dimenzija i osobina dijelova. Temperaturnom kompenzacijom pomoću bimetalnih traka ove se greške mogu svesti na mjeru koja se praktično može zanemariti.

3. MJERNI SUSTAV ZA USPOREDBENO UMJERAVANJE

3.1. Mjerenje tlaka

Samo mjerenje tlaka u industrijskom svijetu ima veliki značaj,kako u industriji tako i u zrakoplovstvu igra veliku ulogu. Ispravnosti i točnost mjerenja tlaka od velikog je značaja jer npr. sitne greške izmjerenog tlaka atmosferskog tlaka mogu biti izrazito opsane u zrakoplovstvu, ako se to dovede u vezu s visinom i izračuna greška može iznositi i do nekoliko desetaka metara što može biti pogubno. To povlači za sobom da se mjerenje tlaka želi izvesti što preciznije i sa što manjom pogreškom dok se raspon tlakova svakim danom sve više povećava.

Tlak se može mjeriti na više načina ovisno o referentnom nivou u odnosu na koji ga mjerimo. Apsolutni tlak se referira na vrlo visoki vakuum (ispod 0,01 Pa), diferencijalni tlak na bilo koju vrijednost tlaka, a pretlak kao podvrsta diferencijalnoga tlaka na promjenjivi atmosferski tlak. Može se reći da je apsolutni tlak jednak zbroju pretlaka i atmosferskog tlaka. Dominantna mjerila srednjeg i visokog tlaka u rasponu od nekoliko kPa do čak 3 GPa su tlačne vage[7].

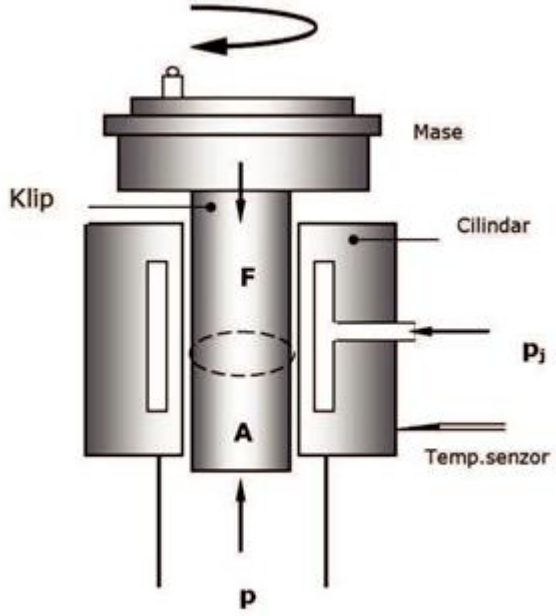


Slika 8. Načini mjerenja tlaka[1]

3.2. Tlačna vaga

Jedno od najtočnijih mjerila tlaka su tlačne vage. Koristi se kao etalon za umjeravanje ostalih instrumenata za mjerenje tlaka. Sama vaga sastoji se od sklopa klip/cilindar, sustava za ostvarivanje vertikalne sile na klip te sustava za generiranje tlaka u radnom fluidu. Najvažniji i najosjetljiviji dio svake tlačne vage je sklop klip/cilindar koji je izrađen s najfinijim tolerancijama,

a služi za definiranje efektivne površine. Mjereni tlak *p* djeluje preko fluida (plin ili ulje) na bazu klipa i pri tome stvara rezultantnu vertikalnu silu koja djeluje prema gore. Toj sili se suprostavlja gravitacijska sila utega *F* koji se postavljaju na klip.



Slika 9. Sklop tlačne vage

Najvažniji zahtjevi koji se postavljaju na tlačnu vagu[6] :

- sklop klip/cilindar mora biti izrađen od materijala sposobnih izdržati visoka dinamička tlačna opterećenja u elastičnom području svoje $\sigma - \varepsilon$ karakteristike i sa što nižim koeficijentom linearne distorzije; današnji trend je upotreba volframovog karbida s različitim udjelima kobalta i nikla za izradu klipa i cilindra
- izrada i završna obrada klipa i cilindra moraju biti s tolerancijama na nivou ispod μm, a zazor između njih ne smije biti veći od 0.5 – 1 μm i mora biti približno konstantan duž cijele granice
- efektivna površina pri atmosferskom tlaku mora biti približno konstantna po cijeloj dužini klipa i cilindra; geometrija treba biti što točnija – promjeri od 1 – 50 mm s odstupanjem od kružnog oblika ±100 nm smatraju se prihvatljivim rezultatom
- posebna pažnja treba biti posvećena brtvljenju kako bi se postigla apsolutna nepropusnost sustava; to se postiže odgovarajućom upotrebom pomno odabranih spojnih elemenata i brtvi; najbitnija je brtva blizu dna cilindra jer mora osigurati nepropusnost pri maksimalnom tlaku tijekom duljeg vremena korištenja tlačne vage
- sklop klip/cilindar mora biti konstruiran na način da se izbjegne sakupljenje tekućine u gornjem dijelu cilindra kako bi se izbjegli neki neželjeni efekti (uzgonsko djelovanje na neke dijelove klipa i sakupljanje tekućine na klipu)

- sklop klip/cilindar mora biti opremljen s termometrom kako bi se se za vrijeme mjerenja mogle očitavati temperature klipa i cilindra budući da efektivna površina značajno zavisi o temperaturi
- pozicioniranje mase na klip može biti ručno ili automatski s pomno odabranim utezima (po mogućnosti integralnim utezima izrađenima od nemagnetičnog, nehrđajućeg čelika) koji će koncentrirati silu na vertikalni dio klipa; klip mora rotirati kako bi se izbjeglo trenje između klipa i cilindra za vrijeme mjerenja tlaka (dovoljna je rotacija brzinom <30 o/min)[6]; dobar sklop klip/cilindar zaustavlja se (s nominalne brzine vrtnje) nakon najmanje 30 minuta[6]; automatski sustav pozicioniranja utega na klip ne smije opteretiti tlačnu vagu nikakvom silom jer se time gubi na preciznosti mjerenja; ako se koriste elektromotori, moraju biti štićeni i daleko od sklopa klip/cilindar da se izbjegne utjecaj njihovih toplinskih gubitaka na točnost mjerenja.

3.3. Vrste tlačnih vaga

Tlačne vage se s obzirom na konstrukciju sklopa klip/cilindar mogu podijeliti na[6]:
- tlačne vage s jednostavnom konfiguracijom sklopa klip/cilindar kod kojih je $p_j = 0$
- tlačne vage s uvučenom konfiguracijom sklopa klip/cilindar kod kojih je $p_j = p$
- tlačne vage s tlakom kontroliranim zazorom kod kojih je $p_j \neq p$

Tlačne vage s jednostavnom konfiguracijom sklopa klip/cilindar:
Tlak koji se mjeri djeluje samo na bazu klipa. U ovoj konfiguraciji klip i cilindar su izloženi slobodnoj elastičnoj deformaciji ovisnoj o tlaku, geometriji klipa i cilindra, elastičnim konstantama klipa i cilindra i o fizikalnim svojstvima radnog fluida. Ovaj tip vaga je najrasprostranjeniji i najčešće upotrebljavan. Maksimalni tlak koji se njima mjeri je 500 Mpa[6]. Ovu izvedbu ograničava velika brzina propadanja klipa pri većim opterećenjima kao posljedica izražene deformacije cilindra i česta izmjena brtvi kod mjerenja visokih tlakova.

Tlačne vage s uvučenom konfiguracijom sklopa klip/cilindar:
Kod ovog tipa tlačnih vaga mjereni tlak djeluje ne samo na donju bazu klipa/cilindra, već i na oplošje cilindra reducirajući time velike deformacije cilindra izloženog visokim tlakovima. Vrijednost deformacije ovisi o istim parametrima nabrojanima kod prethodne vrste tlačnih vaga. U osnovi, ova vrsta tlačnih vaga je konstruirana kako bi se kompenzirale velike distorzije klipa i cilindra pri visokim tlakovima. Radni tlakovi im sežu do 700 Mpa[6], a u prošlosti je bilo specijalnih tipova koji su se koristili do čak 1.3 GPa[6]. Najviši radni tlak ovisit će o radnom području jer pri atmosferskim tlakovima se koriste veliki zazori između klipa i cilindra koji uzrokuju znanto propuštanje. Iako su bile popularne u prošlosti, danas se manje koriste.

Tlačne vage s tlakom kontroliranim zazorom:

Promjenjivi tlak p_j u košuljici cilindra kojim se utječe na veličinu zazora između klipa i cilindra kontrolira se zasebnim sustavom. Veličina zazora ovisi o konstrukcijskoj geometriji sustava, inicijalnom zazoru između klipa i cilindra, vrijednostima p i p_j, elastičnim konstantama klipa i cilindra i o svojstvima radnog fluida kao i u prethodna dva slučaja. Ova konfiguracija je izuzetno korisna za mjerenje tlakova iznad 500 Mpa, do čak 2 Gpa[6], a ono što je čini boljom u odnosu na prethodni tip jest činjenica da je operativna čak i na srednjim tlakovima. To je omogućeno zahvaljujući pravilnom odabiru tlaka p_j kojim je moguće održavati konstantnu vrijednost zazora između klipa i cilindra, a čime se posredno utječe i na željenu brzinu propadanja klipa.

Druga podjela tlačnih vaga je s obzirom na vrstu radnog fluida kojim se ostvaruje sila na klip, pa tako tlačne vage možemo podijeliti na uljne i plinske. Plinske tlačne vage omogućuju mjerenje u pretlačnom kao i u apsolutnom načinu i koriste se u rasponu od nekoliko kPa do nekoliko MPa. Za više tlakove koriste se uljne tlačne vage jer izlaženje plina postaje pri visokim tlakovima preizdašno.

3.3.1. Plinska tlačna vaga

Ove tlačne vage koriste kao radni medij filtrirani zrak ili čisti dušik. Kod plinskih tlačnih vaga pri radu potrebno je određeno vrijeme da se stabiliziraju zbog niske viskoznosti plina kao radnog medija jer to izaziva poremećaje na klipu.

Ovakve tlačne vage mogu raditi na dva načina[6] :

1.)Apsolutni način

2.)Pretlačni način

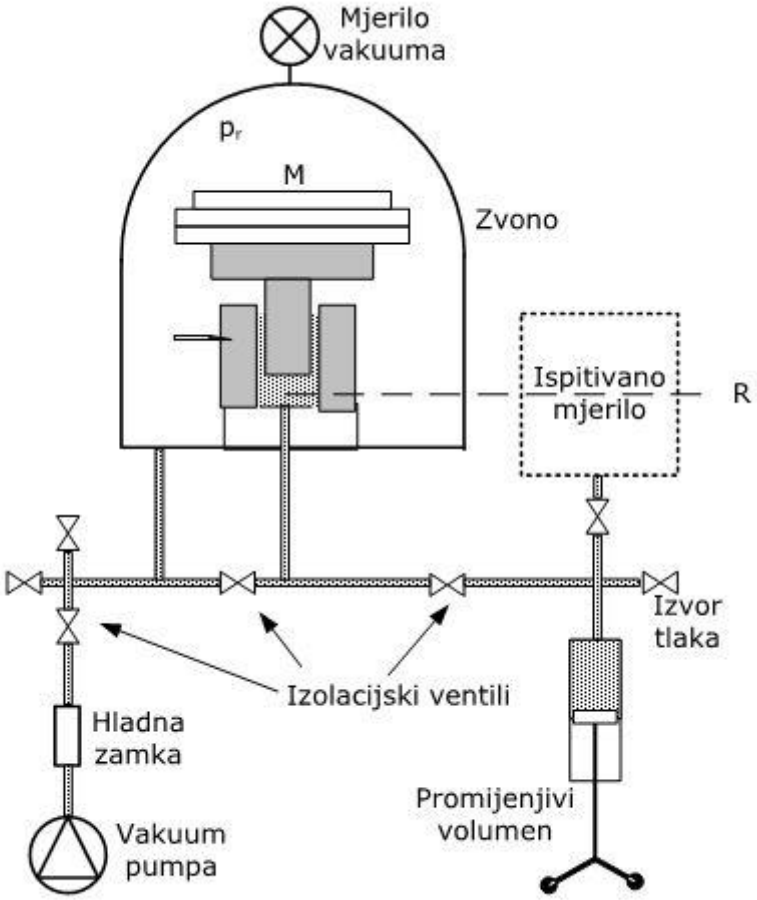
Kod apsolutnog načina vanjski tlak je okolišni, dok kod pretlačnog zrak je evakuiran.

Apsolutni način rada izvodi se tako da se vaga prekrije zvonom, a zatim se vakuum pumpom evakuira zrak. Za ovakav način mjerenja naravno da je potrebna vakuum pumpa ili više vakuum pumpi jer je potrebno održati jako niski tlak. Zbog nemogućnosti stvaranja nultog tlaka uvijek postoji neki zaostali tlak koji će utjecati na nesigurnost mjerenja tj. određeno odstupanje.

3.4. Mjerna linija

Sama mjerna linija sastoji se od plinske tlačne vage, dvije vakuum pumpe, termometra, setova utega (dodatne mase).

3.4.1. Etalonska tlačna vaga



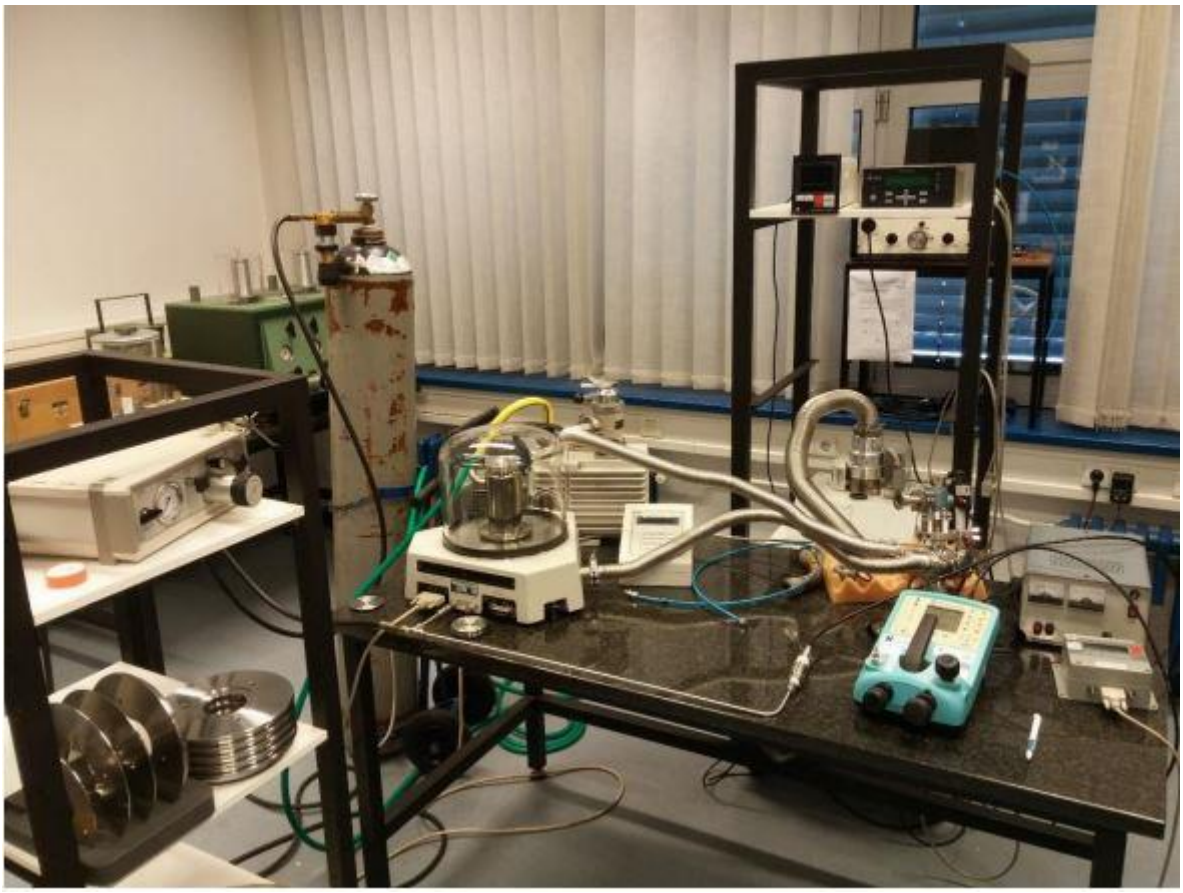
Slika 10. Shema mjerne linije

U ovom radu je korištena plinska tlačna vaga kao etalon za umjeravanje visinomjera, koja je radila u apsolutnom modu. Ova vaga kao radni medij koristi dušik. Neki osnovni podaci:

Tablica 2. Osnovni podaci o etalonskoj vagi

Podaci o etalonu	Oznaka	Iznos	Jedinica	Nesigurnost k=2
Efektivna površina	A_e	$9{,}805024 \times 10^{-4}$	m^2	$2{,}7 \times 10^{-8}$
Koeficijent distorzije	λ	$4{,}2 \times 10^{-6}$	Mpa^{-1}	0
Volumen za koji se radi korekcija	v	0	m^3	-
Ubrzanje sile teže za LPM-a	g	9,806218	m/s^2	0,00002
Opseg klipa	Γ	$1{,}109735 \times 10^{-1}$	m	0
Koeficijent temperaturne ekspanzije	$\alpha p+c$	9×10^{-6}	$°C^{-1}$	2×10^{-7}

Na slici 11. može se vidjeti mjerna linija Laboratorija za procesna mjerenja.



Slika 11. Mjerna linija LPM-a

3.4.2. Visinomjer VD-10

Ispitivano mjerilo je barometarski visinomjer ruske proizvodnje naziva VD-10. Sam visinomjer ima dvije kazaljke i skalu na kojoj pokazuje kilometre visine. Manja kazaljka pokazuje kilometre visine dok veća kazaljka prikazuje metre visine. Korišten je na vojnom transportnom helikopteru Mi-8. Također na sebi ima dugme za podešavanje nultog tlaka, koje se prikazuje na Kollsmanovom prozorčiću.

3.5. Mjerna nesigurnost

Mjerna nesigurnost je parametar pridružen rezultatu mjerenja, koji opisuje rasipanje vrijednosti koje se mogu opravdano pripisati mjernoj veličini. Porocjena mjerne nesigurnosti se zasniva na principima vjerojatnosti. Sva mjerenja imaju određenu mjernu nesigurnost i vrijednost mjerene veličine je kompletna kada sadrži iznos mjerne nesigurnosti. Mjerna nesigurnost obavezno sadrži dva dijela: nivo pouzdanosti i interval pouzdanosti[6]. Ona određuje raspon vrijednosti unutar

kojeg očekujemo da se nalazi (prava) vrijednost mjerene veličine. Nesigurnost se može opisati kao sumnja u rezultat mjerenja, dok je pogreška razlika između mjerne i „stvarne“ vrijednosti.

Pogreške i mjerne nesigurnosti uzrokuju[6]:

-mjerni instrumenti

-objekt mjerenja

-mjerna metoda

-uvezene nesigurnosti

-vještina mjeritelja

-parametri okoline

Nivo pouzdanosti od 95% se koristi za većinu industrijskih primjena, međutim međunarodni pristup izražavanja koristi faktor pokrivanja *k* kako bi proširio standardnu nesigurnost. Najčešće se koristi faktor pokrivanja $k=2$[6] što je jednako nivou pouzdanosti od 95,5%.

Od 1993. godine međunarodno je prihvaćeno da se komponente mjerne nesigurnosti dijele prema njihovom načinu procjenjivanja. Postoje dva tipa mjerne nesigurnosti: Tip A i Tip B[6].

Mjerne nesigurnosti Tipa A[6] su procjene koje se određuju pomoću statističkih metoda na temelju eksperimentom dobivene razdiobe učestalosti opetovanim mjerenjima dobivenih mjernih rezultata.

Mjerne nesigurnosti Tipa B[] mogu biti procijenjene iz prijašnjih mjerenja, znanja o mjernom sustavu, umjeravanja i ostalih certifikata.

Mjerna nesigurnost za pojedino mjerenje je izvedena iz svih doprinosećih standardnih nesigurnosti. Proces procjene mjerne nesigurnosti zahtijeva listu svih čimbenika koji mogu utjecati na mjerenje. Postoje faktori koji se vežu na sami ispitivani instrument ili oni koji se vežu na okolinu. Sama procjena mjerne nesigurnost ovog umjeravanja biti će opisana u nastavku rada.

3.6. Priprema za mjerenje

Prvi korak je naravno spajanje mjerne linije, svih potrebnih dijelova na tlačnu vagu. Potrebno je spojiti vakuum pumpe koje osiguravaju točnije mjerenje tj. evakuiraju prostor ispod zvona da bude što manji utjecaj zaostalog zraka pošto tlačna vaga radi u apsolutnom modu. Također moramo poznavati trenutnu temperaturu koja je isto bitan faktor u umjeravanju. Naravno moramo na etalon

spojit ispitivani instrument koji je u ovom slučaju visinomjer.

Nakon toga trebamo pripremiti utege koji će nam služiti za umjeravanje tj. koji će stvarati silu na efektivnu površinu tlačne vage te samim tim stvarati određeni tlak kojim ćemo umjeravati visinomjer, jer je visinomjer barometarski te radi na principu promjene tlaka s visinom. Potrebno je dovesti u vezu promjenu visine koju treba visinomjer pokazivati, s tlakom na tlačnoj vazi kojeg ćemo narinuti pomoću utega koje ćemo postavljati na tlačnu vagu. Mjerno područje će biti jako mali tlakovi, pošto s povećanjem visine se tlak smanjuje,a na nultoj visini prema standardima uzet je atmosferski tlak od 101325 Pa[7]. Tu veliki utjecaj imaju vakuum pumpe koje moraju osigurati vrlo visoki vakuum, jer pri malim tlakovima malo veća količina zaostalog zraka ispod zvona može dovesti do većih mjernih pogrešaka.

Sljedeći korak je određivanje masa utega potrebnih za umjeravanje visiomjera, tj. određena skupna masa tih utega daje određeni tlak. Iz Zrakoplovnog tehničkog zavoda smo dobili za navedeni visinomjer tablicu tlakova za određene visine koje sam instrument prikazuje tj. na određenoj visini je neka vrijednost tlaka koja nam omogućava umjeravanje visinomjera.

Tablica 3: Odnos visine i barometarskog tlaka[14]

Visina (m)	Barometarski tlak (bar)
0	1,01325
500	0,951141
1000	0,895441
2000	0,7919973
3000	0,6984375
4000	0,6140437
5000	0,5380986
6000	0,4699379
7000	0,4089506
8000	0,3545391
9000	0,3061451

4. LABORATORIJSKA MJERENJA

Eksperimentalni dio završnog rada obavljen je u Laboratoriju za procesna mjerenja Fakulteta strojarstva i brodogradnje

Laboratorij za procesna mjerenja (LPM) dio je Zavoda za termodinamiku, toplinsku i procesnu tehniku Fakulteta strojarstva i brodogradnje (FSB) Sveučilišta u Zagrebu. LPM se bavi nastavom, laboratorijskim vježbama, znanstvenoistraživačkim radom i publiciranjem na području teorije i primjene mjerenja toplinskih i procesnih veličina kao što su: temperatura, tlak, vlažnost, protok, brzina strujanja fluida, masa, nivo, sastav plinova, vlažnosti, termofizikalna svojstva, toplinska energija, i drugo.

LPM je nositelj Državnih etalona temperature i tlaka Republike Hrvatske temeljem Rješenja Državnog Zavoda za normizaciju i mjeriteljstvo (DZNM RH) od 21. listopada 2002. Fundamentalni zadatak LPM-a je ostvarivanje, čuvanje i održavanje ove zakonske fizikalne jedinice sukladno Međunarodnom sustavu mjernih jedinica (SI) i prema potrebama hrvatskog gospodarstva, zaštite života i zdravlja ljudi i životinja, zaštite okoliša i tehničke sigurnosti. LPM osigurava sljedivost Državnih etalona temperature i tlaka RH prema međunarodnim etalonima SI sustava te prenosi iste fizikalne veličine na etalone niže razine za potrebe Nacionalne akreditacijske službe odnosno za potrebe ispitnih, umjernih, znanstvenoistraživačkih i proizvodnih djelatnosti. Prema tome, LPM je na vrhu mjeriteljske hijerarhije temperature i tlaka u Republici Hrvatskoj. Potvrde o umjeravanju koje izdaje LPM dokazuju da je umjereni objekt sljediv sa državnim etalonima. Za čuvanje, održavanje i uporabu Državnih etalona temperature i tlaka LPM je odgovoran i podliježe nadzoru Državnog zavoda za normizaciju i mjeriteljstvo Republike Hrvatske. LPM u državnom etalonskom opsegu i u Rješenju navedenoj najboljoj mjeriteljskoj sposobnosti u potpunosti ispunjava zahtjeve za ispitne i umjerne laboratorije propisane normom HRN ISO/IEC 17025 što je potvrđeno međunarodnom akreditacijom.

LPM je akreditirani DKD laboratorij (DKD - Deutscher Kalibrierdienst -Njemačka umjerna služba) akreditiran od strane PTB-a (Physikalish-Techniche Bundesanstalt- Fizikalno tehnički savezni ured, Republika Njemačka) prema normi ISO/IEC 17025 za umjeravanje mjerila temperature i tlaka pod DAR registracijskim brojem DKD-K-35601 (DAR - Deutscher Akkreditieruns Rat - Njemački akreditacijski savjet). DKD potvrde o umjeravanju koje izdaje LPM dokumentiraju sljedivost umjerenog objekta prema međunarodnom sustavu jedinica (SI). DKD je potpisnik multilateralnog sporazuma Europske suradnje za akreditaciju (EA - European co-operation for accreditation) i Međunarodne suradnje za akreditaciju laboratorija (ILAC -

International laboratory Accreditation cooperation) za međusobno priznavanje potvrda o umjeravanju.

LPM je ovlašteni laboratorij DZNM (Državnog zavoda za normizaciju i mjeriteljstvo) za ovjeravanje mjerila tlaka, temperature i toplinske energije.

4.1. Postupak mjerenja

Nakon spajanja mjerne linije i određivanja dodatnih masa potrebnih za generiranje tlaka u sustavu, napravljena je niz mjerenja tj. umjeravanja visinomjera. Također kako bi se postiglo pravilno umjeravanje pridržavali smo se preporuke EUROAMET-ovog vodiča za umjeravanje Cg-17, te ETSO-C10b od EASA-e. Sam postupak mjerenja radili smo u 8 različitih točaka. Za svaku određenu visinu tj. tlak imamo točno određenu kombinaciju utega koja generira tlak koji prema tablicama je taj tlak na visini koju prikazuje visinomjer. Jednostavnim namještanjem tlaka na vazi kojeg očitamo s digitalnog instrumenta dovodi do zakretanja kazaljke visinomjera te također jednostavnim očitavanjem s ispitivanog instrumenta dolazimo do rezultata. Temperatura i tlak okoliša očitani su neposredno prije mjerenja.

Samo postavljanje utega obavljano je ručno, a samu provjeru tlaka tj. visine vršimo direktno na visinomjeru koji je običnim vodom spojen na tlačnu vagu. Radni fluid je dušik. Zbog vrlo niskih tlakova umjeravanje je vršeno s utezima jako male mase (po nekoliko grama).

Sljedeća tablica daje vrijednosti utega koji su korišteni na tlačnoj vazi.

Tablica 4: Dodatne mase korištene na tlačnoj vazi

Oznaka na utegu	Masa utega m (g)	Nesigurnost mase u_m (g)	Nominalni tlak p_n (bar)	Gustoća utega ρ_m (kg/m^3)	Nesigurnost gustoće $u\rho M$ (kg/m^3)
o.u	800,006	0,1	0,08	5013	75
1	100,0011	0,0004	0,01	8000	75
2	200,0016	0,0006	0,02	8000	75
3	199,9982	0,0006	0,02	8000	75
4	500,0031	0,0015	0,05	8000	75
5	1000,013	0,0025	0,1	8000	75
6	2000,026	0,0058	0,2	8000	75
7	2000,026	0,0046	0,2	8000	75
8	4500,024	0,0067	0,45	8000	75
9	5000,04	0,0089	0,5	8000	75

4.2. Rezultati mjerenja

Tablica 5: Rezultati laboratorijskog mjerenja

Br. ispitnih točaka	**Tlak etalona (bar)**	**Visina etalona H (m)**	**Masa utega**	**Dodatna masa (g)**	**Tlak ispitivanog mjerila (bar)**	**Visina ispitivanog mjerila H_1 (m)**
1	0,306	9000	1,2,3,6	162,5	0,346	8520
2	0,354	8000	2,4,6	4,5	0,352	8140
3	0,409	7000	2,4,6	47	0,355	8055
4	0,538	5000	2,5,6,7	69	0,607	4130
5	0,614	4000	2,5,6,7	142,5	0,614	4045
6	0,792	2000	1,2,3,4,5,9	122,5	0,792	2075
7	0,895	1000	1,2,3,4,5,7,8	156	0,946	635
8	0,951	500	1,2,3,4,5,7,8	213	0,951	585

Sama veza dodatnih masa (utega) i apsolutnog tlaka pomoću kojeg dobijemo vezu s visinom dobije se iz sljedeće formule[6]:

$$p = \frac{F}{Ae} = \frac{mg}{Ae} \tag{4.1}$$

Međutim treba uzeti u obzir sve moguće korekcije pa njezin zapis izgleda ovako[6]:

$$p_e = \frac{\left[\sum_{pi}\left[m_{pi}\cdot\left(1-\frac{\rho_a}{\rho_{mpi}}\right)\right]+\left(h\cdot A_p - v_p\right)\cdot\left(\rho_{N2}-\rho_a\right)\right]\cdot g\cdot\cos\theta_p}{A_{0p}\cdot\left[1+\left(\alpha_{KP}+\alpha_{CP}\right)\cdot\left(t_p-20\right)\right]} \tag{4.2}$$

gdje su:

p_e – efektivni iznos tlaka generiran na sklopu

m_{pi} – prava masa i-tog utega postavljenog na sklop

g – iznos lokalnog gravitacijskog ubrzanja

ρ_a – gustoća zraka okoline

ρ_{mpi} – gustoća i-tog utega

ρ_{N2} – gustoća radnog medija

α_{KP} – koeficijent temperaturnog rastezanja klipa

α_{CP} – koeficijent temperaturnog rastezanja cilindra

A_{0P} – efektivna površina sklopa pri nultom tlaku

t_p – temperature sklopa za vrijeme ispitivanja

θ_p – kut nagiba osi klipa u odnosu na vertikalu

v_p – volumen za koji se radi korekcija zbog uzgonskog djelovanja fluida

h – razlika visina etalonskog i ispitivanog sklopa

Mase svih utega izmjerene su u Laboratoriju za masu koji je nositelj državnog etalona mase, sljediv prema međunarodnim etalonima. Efektivna površina, korekcijski volumen i koeficijenti toplinskog naprezanja poznati su iz izvješća o umjeravanju etalonskog sklopa.

Vrijednost lokalnog gravitacijskog ubrzanja poznata je iz prijašnjih mjerenja.

Nakon provedenih mjerenja i očitavanja dobivenih rezultata iz Tablice 5. se vidi da kod pojedinih točaka dolazi do značajnog odstupanja od etalonskih veličina. Takve pogreške u ovom slučaju možemo pripisati samom ispitivanom instrumentu koji nije korišten već duže vrijeme te također nije umjeravan i ispitivan već dugi niz godina, a upitno je i samo održavanje i skladištenje istog. Također ispitivani instrument datira iz 1960. godine te se i to može uzeti kao otegotna okolonost. Međutim cilj ovog rada je pokazati vezu promjene visine i tlaka te mogunost njihovog uspoređivanja pomoću tlačne vage što i nije praksa kod umjeravanja visinomjera, jer kod kalibriranja visinomjera najčešće se koristi barokomora. Međutim cilj ovog rada je bio pokazati da je moguće i pomoću tlačne vage umjeriti visinomjer.

Razlika pokazivanja mjernog instrumenta i etalonske vrijednosti jednostavno se dobije iz formule:

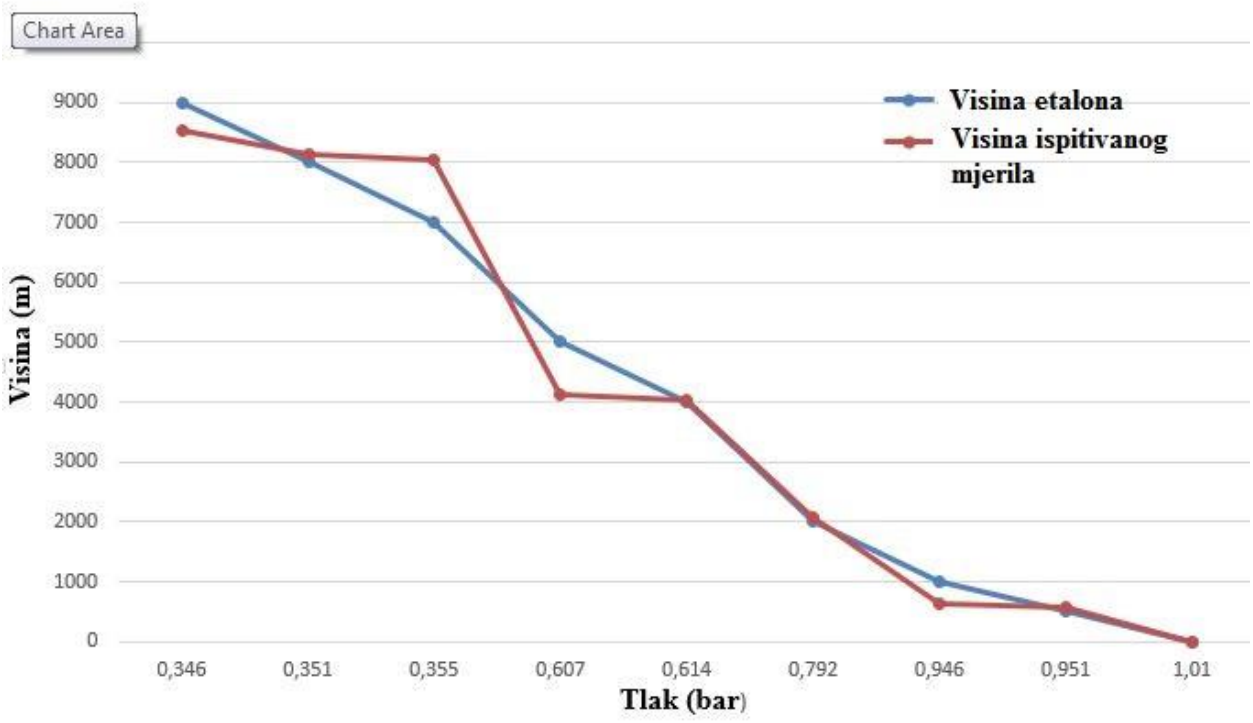
$$\Delta H = H - H_1 \tag{4.3}$$

Iz toga za svaku pojedinu točku dobijemo odstupanje ispitivanog instrumenta.

Tablica 6: Razlika u pokazivanju mjernog instrumenta

Br. Ispitne točke	**Razlika ΔH (m)**	**Razlika Δp (bar)**
1	480	-0,04
2	-140	0,002
3	-1055	0,054
4	870	-0,069
5	-45	0,0002
6	-75	0,0003
7	365	-0,051
8	-85	0,0004

Sljedeći dijagram prikazuje razliku prikazane visine na ispitivanom mjerilu sa stvarnom (etalonskom) visinom.



Slika 12. Prikaz razlike ispitivanog mjerila i etalona

Maksimalno dozvoljeno odstupanje visinomjera iznosi [8]:

1. Na visini od 7000 m do 9000 m: $\Delta H = \pm 130$ m
2. Na visini od 500 m do 7000 m: $\Delta H = \pm 50$ m

5. PROCJENA MJERNE NESIGURNOSTI

Rezultati mjerenja nisu potpuni ako uz sam rezultat mjerenja nije izračunato odstupanje i mjerna nesigurnost. Svaki rezultati mjerenja su potpuni samo ako imaju sve ove veličine zapisane. Za ovo mjerenje smo odstupanje označili s ΔH.

Mjerna nesigurnost za ovo mjerenje se sastoji od tri člana :

U_e – Mjerna nesigurnost etalona

U_r – Mjerna nesigurnost ispitivanog mjerila

U_h – Mjerna nesigurnost uslijed histereze

Ukupna mjerna nesigurnost se izražava [6]:

$$U = \sqrt{Ue^2 + Ur^2 + Uh^2} \qquad (5.1.)$$

Mjerna nesigurnost etalona Ue iznosi : $1{,}1 \times 10^{-4} \times p$.

Mjerna nesigurnost ispitivanog mjerila U_r iznosi : 0,018 bar[1]

Mjernja nesigurnost uslijed histereze U_h iznosi : 0. Takva činjenica stoji iza toga da samo mjerenje nije urađeno u dva smjera zbog problema s radom umjeravanog instrumenta.

Na sljedećoj stranici će se prikazati izračun mjerne nesigurnosti za sve ispitne točke. Mjerna nesigurnost proračunata je kao proširena mjerna nesigurnost i za proračun je korišten pripadajući matematički model.

Tablica 7. Mjerne nesigurnosti po ispitnim točkama[9]

Ispitna točka 1, p=0,346 bar				
Utjecajna veličina	Izvor	Vrijednost (bar)	Faktor	u^2 (bar^2)
Etalon	Umjernica	$3,809x10^{-5}$	0,5	0
Etalon pod uvjetima ispitivanja	Mjerenje	$7,618x10^{-6}$	0,57737	0
Razlučivost pokazivača	1/5*podjela	0,1	0,57737	0,00333356
Odstupanje od nultočke	Mjerenje	0	0,2887	0
Histereza	Mjerenje	0	0,2887	0
			Suma u^2 (bar^2)	0,00333356
			Mjerna nesigurnost (bar)	0,115

Ispitna točka 2, p=0,352 bar				
Utjecajna veličina	Izvor	Vrijednost (bar)	Faktor	u^2 (bar^2)
Etalon	Umjernica	$3,866x10^{-5}$	0,5	0
Etalon pod uvjetima ispitivanja	Mjerenje	$7,733x10^{-5}$	0,57737	0
Razlučivost pokazivača	1/5*podjela	0,1	0,57737	0,00333356
Odstupanje od nultočke	Mjerenje	0	0,2887	0
Histereza	Mjerenje	0	0	0
			Suma u^2 (bar^2)	0,00333356
			Mjerna nesigurnost (bar)	0,115

Ispitna točka 3, p=0,355 bar				
Utjecajna veličina	Izvor	Vrijednost (bar)	Faktor	u^2 (bar^2)
Etalon	Umjernica	$3,902x10^{-5}$	0,5	0
Etalon pod uvjetima ispitivanja	Mjerenje	$7,804x10^{-5}$	0,57737	0
Razlučivost pokazivača	1/5*podjela	0,1	0,57737	0,00333356
Odstupanje od nultočke	Mjerenje	0	0,2887	0
Histereza	Mjerenje	0	0	0
			Suma u^2 (bar^2)	0,00333356
			Mjerna nesigurnost (bar)	0,115

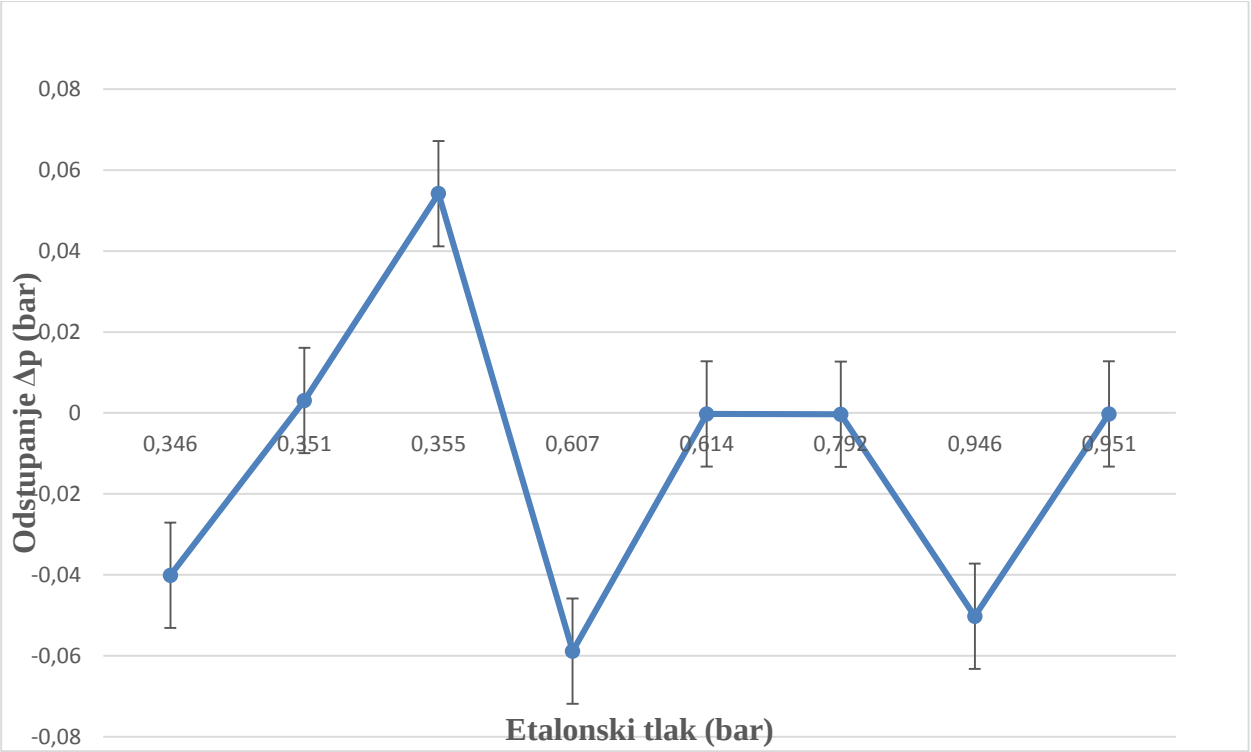
Ispitna točka 4, p=0,607 bar				
Utjecajna veličina	Izvor	Vrijednost (bar)	Faktor	u^2 (bar^2)
Etalon	Umjernica	$6,677x10^{-5}$	0,5	0
Etalon pod uvjetima ispitivanja	Mjerenje	$1,335x10^{-5}$	0,57737	0
Razlučivost pokazivača	1/5*podjela	0,1	0,57737	0,00333356
Odstupanje od nultočke	Mjerenje	0	0,2887	0
Histereza	Mjerenje	0	0	0
			Suma u^2 (bar^2)	0,00333356
			Mjerna nesigurnost (bar)	0,115

Ispitna točka 5, p=0,614 bar				
Utjecajna veličina	Izvor	Vrijednost (bar)	Faktor	u^2 (bar^2)
Etalon	Umjernica	$6,757x10^{-5}$	0,5	0
Etalon pod uvjetima ispitivanja	Mjerenje	$1,351x10^{-5}$	0,57737	0
Razlučivost pokazivača	1/5*podjela	0,1	0,57737	0,00333356
Odstupanje od nultočke	Mjerenje	0	0,2887	0
Histereza	Mjerenje	0	0	0
			Suma u^2 (bar^2)	0,00333356
			Mjerna nesigurnost (bar)	0,115

Ispitna točka 6, p=0,792 bar				
Utjecajna veličina	Izvor	Vrijednost (bar)	Faktor	u^2 (bar^2)
Etalon	Umjernica	$8,716x10^{-5}$	0,5	0
Etalon pod uvjetima ispitivanja	Mjerenje	$1,743x10^{-5}$	0,57737	0
Razlučivost pokazivača	1/5*podjela	0,1	0,57737	0,00333356
Odstupanje od nultočke	Mjerenje	0	0,2887	0
Histereza	Mjerenje	0	0	0
			Suma u^2 (bar^2)	0,00333356
			Mjerna nesigurnost (bar)	0,115

Ispitna točka 7, p=0,946 bar				
Utjecajna veličina	Izvor	Vrijednost (bar)	Faktor	u^2 (bar^2)
Etalon	Umjernica	0,000104	0,5	0
Etalon pod uvjetima ispitivanja	Mjerenje	$2,081x10^{-5}$	0,57737	0
Razlučivost pokazivača	1/5*podjela	0,1	0,57737	0,00333356
Odstupanje od nultočke	Mjerenje	0	0,2887	0
Histereza	Mjerenje	0	0	0
			Suma u^2 (bar^2)	0,00333356
			Mjerna nesigurnost (bar)	0,115

Ispitna točka 8, p=0,951 bar				
Utjecajna veličina	Izvor	Vrijednost (bar)	Faktor	u^2 (bar^2)
Etalon	Umjernica	0,0001046	0,5	0
Etalon pod uvjetima ispitivanja	Mjerenje	$2,092x10^{-5}$	0,57737	0
Razlučivost pokazivača	1/5*podjela	0,1	0,57737	0,00333356
Odstupanje od nultočke	Mjerenje	0	0,2887	0
Histereza	Mjerenje	0	0	0
			Suma u^2 (bar^2)	0,00333356
			Mjerna nesigurnost (bar)	0,115



Slika 13. Iznos odstupanja i mjerna nesigurnost

Kao što se može vidjeti iz gore izračunatih tablica, a također i očitati s dijagrama jest da je mjerna nesigurnost za svaku ispitnu točku jednaka dok odstupanje nije. Razlog što je mjerna nesigurnost u svakoj točki ista je taj što ne postoji nesigurnost uslijed histereze, dok je mjerna nesigurnost etalona izrazito mala pa se ne uzima u obzir. Izračunati iznos mjerne nesigurnosti se zapravo odnosi na ispitivano mjerilo tj. mogućnost preciznog očitavanja s njegove skale.

Mjerna nesigurnost iznosi: $U = \pm 0{,}115$ bar.

6. ZAKLJUČAK

U radu su prikazani načini mjerenja visine kod zrakoplova od kojih je jedan barometarski visinomjer, te je uz pomoć tlačne vage kao etalona vršeno umjeravanje visinomjera tj. dana je veza promjene tlaka s visinom. Eksperimentalni dio ovog rada obavljen je u Laboratoriju za procesna mjerenja Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Samo umjeravanje visinomjera i određivanje dodanih masa potrebnih za tlačnu vagu urađeno je uz pomoć stručnog osoblja, te pošto je vaga državni etalon za tlak nisam smio sam provoditi mjerenja. Umjeravanje visinomjera obavljeno je u jednom ciklusu. Tlakove za određene visine kod ispitivanog instrumenta smo preuzeli od Zrakoplovnog tehničkog zavoda. Nakon toga smo za određene tlakove izračunali i odredili kolika nam je potrebna dodatna masa da ostvarimo takav tlak na tlačnoj vazi. Rezultati su se pokazali donekle korektnima, međutim u nekim točkama ispitivanja samo mjerilo je prikazivalo značajne pogreške. Također od velikog značaja za kvalitetne rezultate je i rezolucija ispitivanog mjerila i rezolucija etalona što je kod visinomjera izrazito bitno, pošto većina tlakova za rad visinomjera je izrazito male vrijednosti i pogreška za nekoliko paskala dovodi do značajnih pogrešaka. Također od izrazite važnosti kod svakog umjeravanja pa tako i ovog je procjena mjerne nesigurnosti. Kao što je navedeno u radu ukupna mjerna nesigurnost se odnosi na mjernu nesigurnost ispitivanog mjerila zbog vrlo malog iznosa mjerne nesigurnosti etalona i nepostojanja nesigurnosti uslijed histereze. Na kraju dolazimo do zaključka da je moguće vršiti umjeravanje pomoću tlačne vage, međutim upitna je visoka točnost koju zahtijeva visinomjer.

LITERATURA

[1] Avionski instrumenti, ing. Branislav Ranković, Tehnička knjiga Beograd

[2] http://standards.sae.org/as392c/

[3] http://www.bksv.com/library/dictionary.aspx?key=s

[4] http://enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=6001

[5] http://enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=2712

[6] FSB-LPM, Podloge za vježbe iz kolegija: Mjerenja u zrakoplovstvu II

[7] Skupina autora, Deadweight Pressure Gauges,Boulder, 1998.

[8] Tehnološka lista broj 2, Visinomjer VD-28, Zmaj, Velika Gorica

[9] EAL Committee 2 (Calibration and Testing activities), EURAMET Calibration Guide EM/cg/03.01/p, EURAMET, 2010.

[10] http://easa.europa.eu/system/files/dfu/CS-ETSO.pdf

[11] DKD – R6 – 1

[13] Skupina autora, Guide to the Measurement of Pressure and Vacuum, NPL, London, 1998.