

Ocjena kvalitete upravljanja za dugoperiodični mod uzdužnog gibanja zrakoplova Cessna 172

Mrnjavac, Mateo

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:718402>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-22**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Transport and Traffic Sciences - Institutional Repository](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Mateo Mrnjavac

**OCJENA KVALITETE UPRAVLJANJA ZA DUGOPERIODIČNI MOD
UZDUŽNOG GIBANJA ZRAKOPLOVA CESSNA 172**

ZAVRŠNI RAD

ZAGREB, 2022.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

ZAVRŠNI RAD

**OCJENA KVALITETE UPRAVLJANJA ZA DUGOPERIODIČNI MOD
UZDUŽNOG GIBANJA ZRAKOPLOVA CESSNA 172**

**ASSESSMENT OF CONTROL QUALITY FOR THE LONG PERIOD
LONGITUDINAL MOTION MODE OF THE CESSNA 172 AIRCRAFT**

Mentor: doc. dr. sc. Karolina Krajček Nikolić

Student: Mateo Mrnjavac

JMBAG: 0135255382

Zagreb, kolovoz 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI
ODBOR ZA ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 31. ožujka 2022.

Zavod: **Zavod za aeronautiku**
Predmet: **Teorija leta II**

ZAVRŠNI ZADATAK br. 6741

Pristupnik: **Mateo Mrnjavac (0135255382)**
Studij: **Aeronautika**
Smjer: **Pilot**
Usmjerenje: **Civilni pilot**

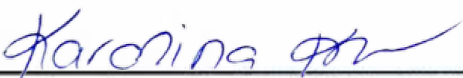
Zadatak: **Ocjena kvalitete upravljanja za dugoperiodični mod uzdužnog gibanja zrakoplova Cessna 172**

Opis zadatka:

Definirati pojam kvaliteta upravljanja. Opisati kvalitetu upravljanja za mod uzdužnog gibanja. Opisati i provesti eksperimentalnu metodu ocjene kvalitete upravljanja za dugoperiodični mod uzdužnog gibanja zrakoplova Cessna 172. Napisati i komentirati rezultate te usporediti ih s rješenjima dobivenim teorijskim metodama.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:



doc. dr. sc. Karolina Krajček Nikolić

SAŽETAK

Stabilnost zrakoplova je tendencija zrakoplova da se nakon poremećaja vrati u ravnotežno stanje koje je imao prije poremećaja. S druge strane, potpuno suprotno od stabilnosti, svrha upravljivosti bi bila što lakša promjena ravnotežnog stanja i dovođenje zrakoplova u neravnotežna ubrzana gibanja (rađenje manevara). U ovome radu se eksperimentalnim letom pokazuje stupanj uzdužne stabilnosti kod dugoperiodičnog gibanja, a samim time i upravljivosti najpopularnijeg školskog zrakoplova na svijetu, Cessne 172. Također se i matematički, uzevši savršene teorijske uvjete u obzir, računaju elementi koji pokazuju stupanj stabilnosti Cessne kod dugoperiodičnog gibanja. Tako se dobiju i rezultati iz prakse i rezultati iz teorije koje je moguće usporediti. Iz svega navedenog se zaključuje koliko je Cessna 172 za mnoge, manje bitno upravljiv, a sa druge strane puno bitnije stabilan i siguran zrakoplov.

KLJUČNE RIJEČI: stabilnost; upravljivost; Cessna 172; dugoperiodično gibanje; eksperimentalni let; teorijski izračuni

SUMMARY

Aircraft stability is the tendency of the aircraft to return to the equilibrium state it had before the disturbance. On the other hand, the complete opposite of stability, the purpose of maneuverability would be as easy as possible to change the equilibrium state and bring the aircraft into unbalanced accelerated movements (to perform maneuvers). In this paper, the degree of longitudinal stability in long-period motion, and at the same time the controllability of the most popular school plane in the world, the Cessna 172, is demonstrated through an experimental flight. Also mathematically, taking into account perfect theoretical conditions, the elements that show the stability of the Cessna in long-period motion are calculated. In this way, results from practice and results from theory are obtained, which can be compared. From all work is concluded how much is Cessna controllable, more important how much is it stable and safe aircraft.

KEY WORDS: stability; controllability; Cessna 172; long period motion; experimental flight; theoretical calculations

1. UVOD	1
2. STABILNOST I UPRAVLJIVOST	2
2.1. Statička stabilnost	2
2.2. Dinamička stabilnost	3
2.3. uzdužna statička stabilnost zrakoplova.....	4
2.4. Uzdužna dinamička stabilnost zrakoplova	7
3. KARAKTERISTIKE CESSNE 172	9
3.1. Opće informacije	9
3.2. ograničenja	11
3.3. Performanse zrakoplova	11
4. EKSPERIMENTALNI LET	14
4.1. Postupak provedbe eksperimentalnog leta.....	14
4.2. Planiranje eksperimentalnog leta.....	15
4.3. Tablice i rezultati eksperimentalnog leta.....	16
4.4. Grafovi i značajni podaci eksperimentalnog leta.....	21
5. TEORIJSKI IZRAČUNI ELEMENATA DUGOPERIODIČNOG MODA 32	
5.1. Opis izračuna elemenata dugoperiodičnog moda	32
5.2. Rješenja parametara dugoperiodičnog moda.....	33
5.3. Usporedba teorijskih rezultata i rezultata dobivenih eksperimentalnim letom.....	34
6. ZAKLJUČAK.....	36
LITERATURA	38
Popis slika:	40
Popis tablica:.....	42

1. UVOD

Aerodinamika je znanost koja proučava djelovanje zraka, na tijela koja se kroz njega gibaju, te sile koje pri tome nastaju. Sila na kraku daje moment, koji djeluje oko neke točke ili osi i ovisno o situaciji može biti stabilizirajući ili destabilizirajući. Stabilnost zrakoplova je tendencija da se zrakoplov nakon nekog poremećaja vrati u ravnotežno stanje koje je imao prije poremećaja. Uzdužna stabilnost zrakoplova je stabilnost zrakoplova oko lateralne odnosno poprečne osi zrakoplova. Preciznije rečeno to je mogućnost zrakoplova da se vrati u ravnotežno stanje nakon poremećaja pomoću gibanja oko poprečne osi, koristeći najviše horizontalnu repnu površinu kako bi prouzročio propinjanje ili poniranje. Dugoperiodičan mod gibanje u kojem zrakoplovu treba neko određeno vrijeme kako bi se on vratio u ravnotežan položaj, u tom modu zrakoplov izmjenjuje potencijalnu i kinetičku energiju kako bi povratio ravnotežan let odnosno let konstantnom brzinom bez ikakvih akceleracija. Jednostavnije rečeno kod dugoperiodičnih oscilacija avion doživi promjene visine i brzine pri gotovo konstantnom napadnom kutu. S druge strane upravljivost je odziv zrakoplova na namjerni otklon upravljačkih površina. Treba naznačiti kako su to suprotni pojmovi, odnosno zrakoplov koji ima visok stupanj stabilnosti ima nizak stupanj upravljivosti i obrnuto. Analizom letova, mjerenjem i računanjem određenih elemenata moguće je grafički i matematički pokazati i usporediti kvalitetu stabilnosti, a samim time i upravljivosti određenog zrakoplova. Određivanje stabilnosti i upravljivosti tim putem bi bio jedan od glavnih zadataka zrakoplovnih proizvođača kako bi njihovi zrakoplovi dobili certifikat plovidbenosti.

Ovaj završni rad nastoji pokazati stupanj stabilnosti, a samim time i upravljivosti zrakoplova Cessna 172, najprodavanijeg i najpopularnijeg školskog zrakoplova na svijetu. Samim time provjerava se njihova pouzdanost i pokazuje se koliko su ti zrakoplovi sigurni i koliko stvarni uvjeti mogu odstupati od onih teoretskih.

Rad je podijeljen u ukupno šest cjelina, uključujući i uvodnu cjelinu:

1. Uvod
2. Stabilnost i upravljivost
3. Karakteristike Cessne 172
4. Eksperimentalni let i određivanje elemenata dugoperiodičnog moda
5. teorijski izračuni elemenata dugoperiodičnog moda
6. Zaključak

U drugom poglavlju opisani su pojmovi stabilnosti i upravljivosti zrakoplova potrebni za razumijevanje daljnjeg teksta. Treće poglavlje odnosi se na bitne karakteristike zrakoplova Cessne 172 za provedbu leta. U četvrtom poglavlju opisan je način provedbe i dobivanja grafičkih i matematičkih rezultata koji opisuju dugoperiodični mod iz eksperimentalnog leta pomoću kojih se prikazuje koliko je Cessna stabilan, a samim time i upravljiv zrakoplov. U petom poglavlju su pomoću teorijskih podataka za Cessnu 172 izvedeni izračuni kako bi se mogli usporediti sa eksperimentalnim letom i kako bi se dobila ideja koliko na jednom primjeru se mogu razlikovati stvarni podaci sa nekog leta i teorijski podaci u vidu stabilnosti i upravljivosti. Na kraju u zadnjem, šestom, poglavlju dat je osvrt na rad i izvučeni su neki osnovni zaključci vidljivi iz rada.

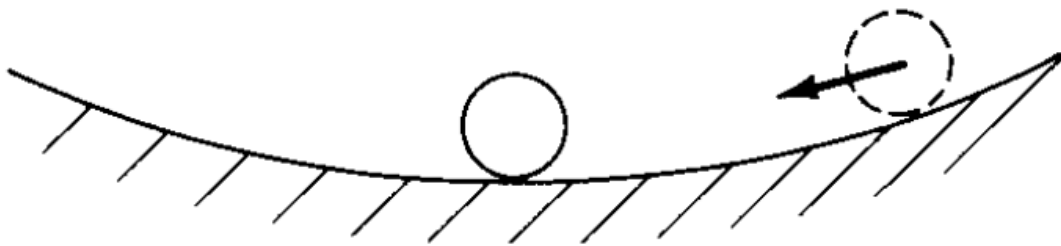
2. STABILNOST I UPRAVLJIVOST

Općenito, stabilnost je svojstvo nekog sustava da se vraća u prvobitno stanje ravnoteže te da ju i održava. U zrakoplovstvu, stabilnost zrakoplova bi bila tendencija zrakoplova da se nakon poremećaja vrati u prijašnje stanje ravnoteže samostalno, odnosno bez ikakve akcije posade. Na primjer zrakoplov leti uravnoteženi let, odnosno let u kojemu su svi rezultatni momenti i sile oko centra težišta jednaki nuli, te uleti u turbulentni zrak koji poremeti to stanje ravnotežnog leta odnosno jave se neki momenti i sile, stabilan zrakoplov će imati tendenciju vraćanja u ravnotežni položaj te će se u teoriji nakon nekog vremenskog perioda vratiti u uravnotežen let koji je imao prije poremećaja. Stabilnost se dijeli na statičku i dinamičku stabilnost. Obje stabilnosti će biti opisane u narednim potpoglavljima. S druge strane upravljivost je odziv zrakoplova na namjerni otklon upravljačkih površina te sile potrebne za otklon upravljačke palice. Kvaliteta upravljanja je lakoća s kojom pilot održava ravnoteži let. Svrha upravljivosti bi bila što lakša promjena ravnotežnog stanja i dovođenje zrakoplova u neravnotežna ubrzana gibanja (rađenje manevara). Generalno zrakoplov koji je jako stabilan je malo upravljiv i obrnuto [1, 2].

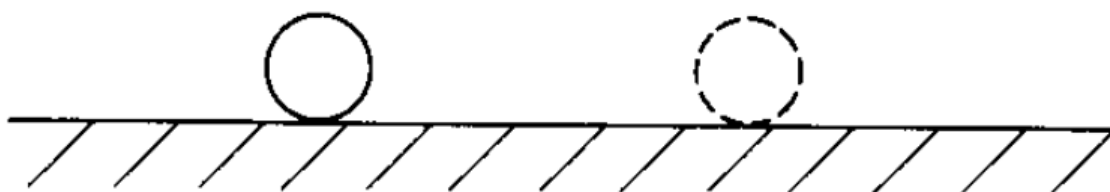
2.1. STATIČKA STABILNOST

Statička stabilnost zrakoplova je njegov inicijalni odziv nakon nekog poremećaja. Prema statičkoj stabilnosti zrakoplov može biti:

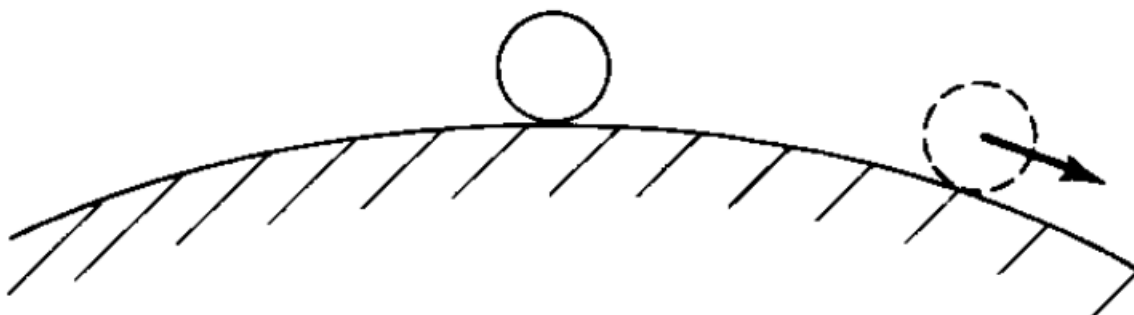
- Stabilan, što bi značilo da zrakoplov ima inicijalni odziv koji ga počinje vraćati u stanje ravnoteže koje je imao prije poremećaja. Primjer pozitivne statičke stabilnosti možemo vidjeti na slici 1, kao kuglicu koja nakon poremećaja ima inicijalni odziv vraćanja u početno stanje koje je imala prije poremećaja. Kao primjer se može zamisliti zrakoplov koji leti u horizontalnome letu i odjednom doživi turbulenciju koja podigne nos zrakoplova i on počne penjati. Ako je zrakoplov statički stabilan njegov inicijalni odziv će biti zaustavljanje propinjanja i tendencija spuštanja nosa ka dolje odnosno vraćanja u prvobitni položaj.
- Neutralan, što bi značilo da zrakoplov ima inicijalni odziv koji ga ostavlja u novom položaju u koji je došao nakon poremećaja. Primjer statičke neutralnosti možemo vidjeti na slici 2, kao kuglicu koja je nakon poremećaja ostaje tamo gdje je i pomaknuta. Kao primjer može se uzeti zrakoplov u horizontalnome letu koji doživi turbulenciju koja mu podigne nos. Ako je zrakoplov statički neutralan, praktički neće biti inicijalnog odziva nego će mu nos ostati u poziciji u koju ga je dovela turbulencija.
- Nestabilan, što bi značilo da zrakoplov ima inicijalni odziv koji ga tjera da se nastavi gibati u smjeru poremećaja. Primjer statičke nestabilnosti ili negativne statičke stabilnosti možemo vidjeti na slici 3, kao kuglicu koja nakon poremećaja ima inicijalni odziv koji ju tjera da se nastavi gibati u smjeru poremećaja. Kao primjer se opet može uzeti avion u horizontalnome ravnotežnom letu koji doživi turbulenciju koja mu diže nos. Ako je zrakoplov statički nestabilan njegov inicijalni odziv biti će dodatno dizanje nosa ka gore. Takva zrakoplov se bez reakcije posade odnosno pilota neće moći sam vratiti u ravnotežno stanje koje je imao prije poremećaja [1, 2].



Slika 1. Primjer pozitivne statičke stabilnosti [1]



Slika 2. Primjer neutralne statičke stabilnosti [1]



Slika 3. Primjer negativne statičke stabilnosti tj. statičke nestabilnosti [1]

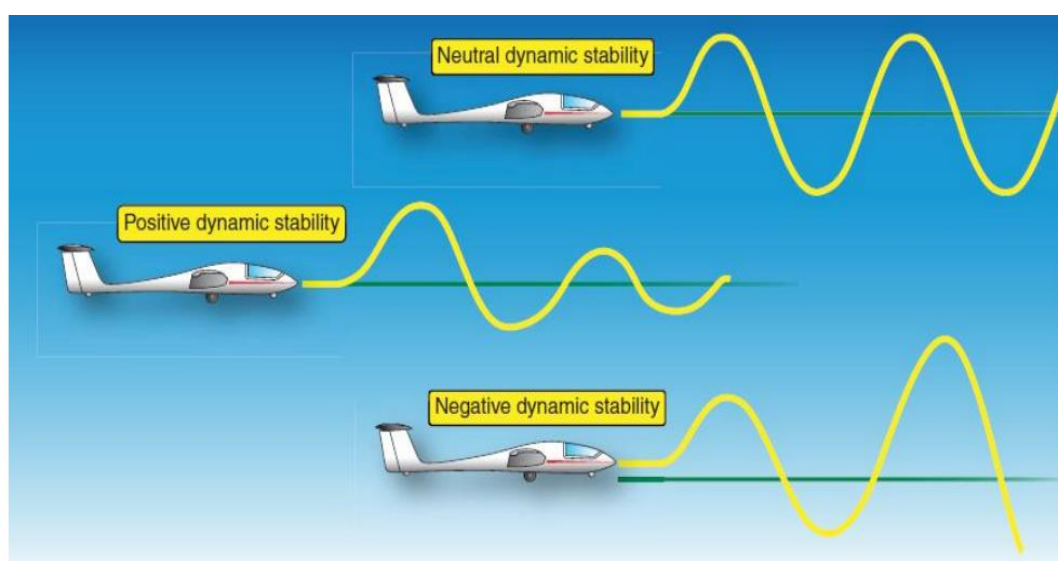
2.2. DINAMIČKA STABILNOST

Dinamička stabilnost se bavi odzivom zrakoplova u određenom vremenskom periodu nakon inicijalnog odziva. Da bi zrakoplov bio dinamički stabilan, prvo mora biti statički stabilan. Zrakoplov može biti:

- Dinamički stabilan, što bi značilo da će se zrakoplov nakon početnog poremećaja vratiti u ravnotežni položaj koji je imao prije poremećaja. Primjer dinamičke stabilnosti može se vidjeti na slici 4 (zrakoplov u sredini), može se primijetiti kako se nakon poremećaja

amplituda od ravnotežnog položaja smanjuje te kako se zrakoplov tijekom nekog vremenskog perioda vraća u prvobitno stanje ravnoteže.

- Dinamički neutralan, što bi značilo da se zrakoplov nakon početnog položaja neće vratiti u početni ravnotežni položaj koji je imao prije poremećaja nego da će zrakoplov imati stalnu oscilaciju i stalnu amplitudu tijekom nekog vremenskog perioda, ta amplituda se neće niti smanjivati niti povećavati. Na slici 4 možemo vidjeti primjer dinamički neutralnog zrakoplova (zrakoplov gore).
- Dinamički nestabilan, što bi značilo da se zrakoplov nakon početnog poremećaja neće vratiti u početni položaj koji je imao prije poremećaja nego da će nastaviti odstupati sve više i više od tog početnog ravnotežnog položaja. Na slici 4 može se vidjeti dinamički nestabilan zrakoplov (zrakoplov dolje), može se primijetiti kako on sve više i više oscilira od početnog ravnotežnog položaja te kako mu se amplituda povećava tijekom nekog vremenskog perioda [2].



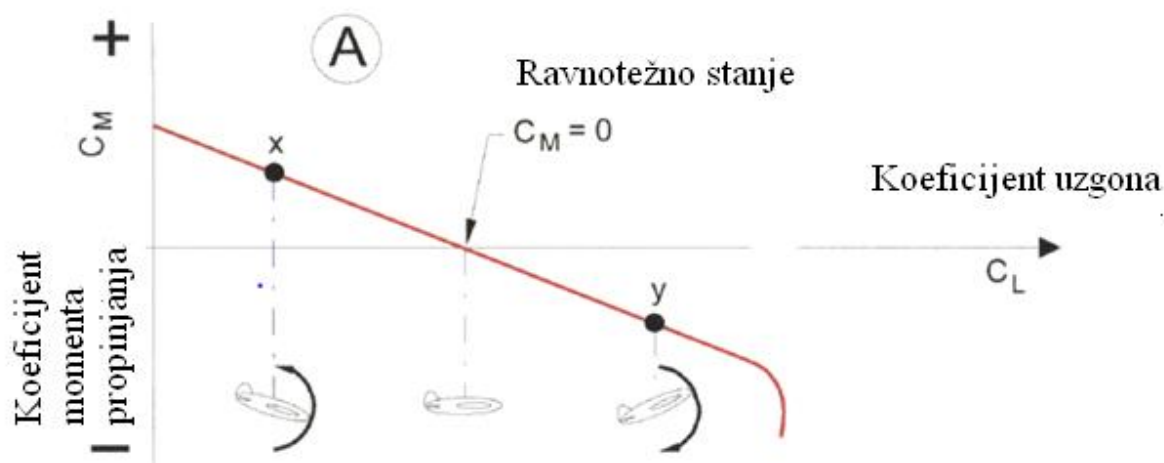
Slika 4. Primjeri dinamičke neutralnosti, stabilnosti i nestabilnosti [12]

2.3. UZDUŽNA STATIČKA STABILNOST ZRAKOPLOVA

Uzdužna stabilnost zrakoplova je stabilnost oko njegove lateralne ili poprečne osi. Tu se razmatra propinjanje i poniranje zrakoplova. Da bi zrakoplov bio dinamički stabilan on mora biti prvo statički stabilan, pa će se taj dio prvo i opisati.

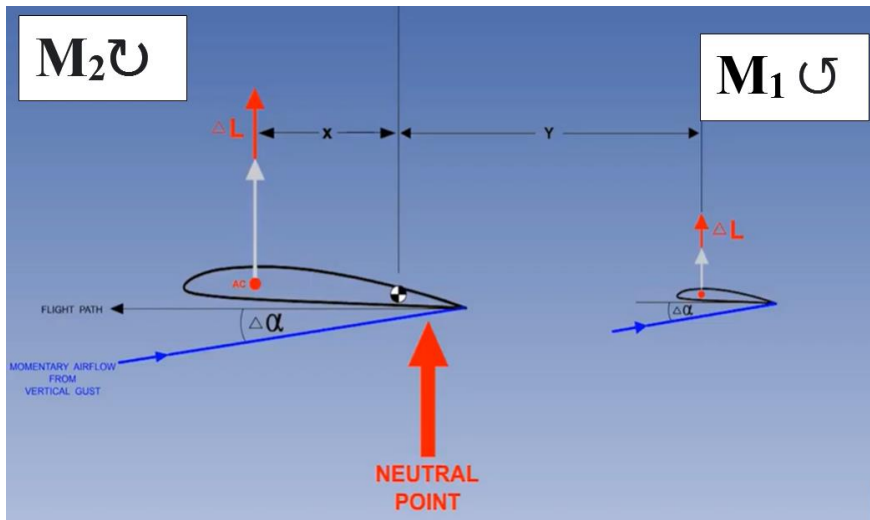
Uzdužna statička stabilnost ovisi o vezi između momenta propinjanja i napadnog kuta ili koeficijenta uzgona. Kriteriji uzdužne statičke stabilnosti su: negativan moment propinjanja za pozitivnu promjenu napadnog kuta ili koeficijenta uzgona i da vrijednost koeficijenta momenta pri nultom uzgonu mora biti veći od nula kako bi postojao napadni kut za koji će zrakoplov biti uravnotežen. Jednostavnije rečeno, da bi zrakoplov bio stabilan on mora pri negativnom napadnom kutu kada ponire imati pozitivan moment propinjanja koji će imati tendenciju da ga vrati u ravnotežu odnosno da zrakoplov propne nazad u ravnotežno stanje. S druge strane pri pozitivnim napadnim kutovima odnosno napadnim kutovima koji generiraju višak uzgona i propinjanje zrakoplova, tada zrakoplov mora imati negativan moment propinjanja kako bi imao tendenciju vraćanja u ravnotežni položaj.

Krivulja koja opisuje ovisnost momenta propinjanja i poniranja u vezi sa koeficijentom uzgona je prikazana na slici 5 [2].

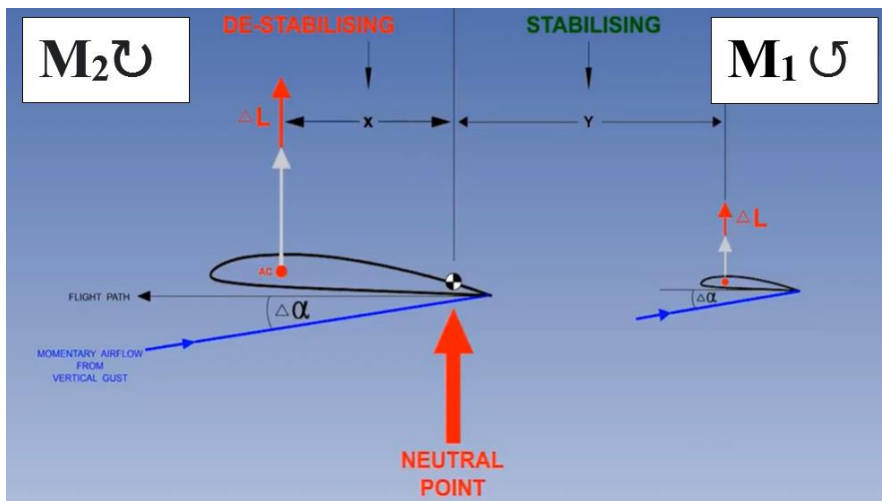


Slika 5. Grafički prikaz uzdužne statičke stabilnosti [2]

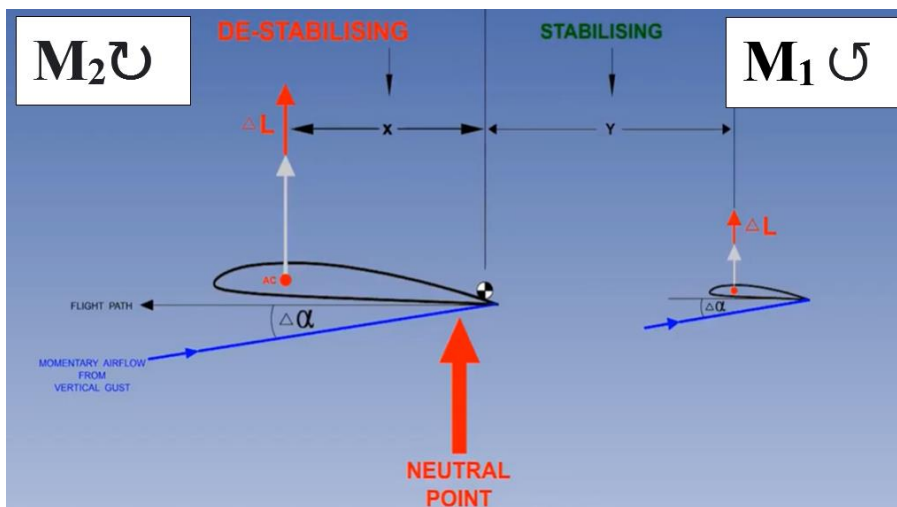
Kako bi do kraja bila jasna statička stabilnost, trebaju se spomenuti i neutralna točka i kako to pomak težišta, C.G. (*center of gravity*) utječe na statičku stabilnost. Neutralna točka je točka koja daje neutralnu statičku stabilnost ako se na njenu poziciju postavi težište zrakoplova. Za dani dizajn zrakoplova, neutralna točka je fiksna vrijednost i ne ovisi o stvarnom položaju centra mase, tako da jedina vrijednost koju pilot zrakoplova može promijeniti je položaj težišta. Za pozitivnu statičku stabilnost nužno je da težište bude ispred neutralne točke, tako će stabilizirajući moment repne površine zrakoplova biti veći od destabilizirajućeg momenta uzgona iz aerodinamičkog centra. Na slici 6 vidimo situaciju u kojoj je težište ispred neutralne točke. Na toj slici vidimo kako je stabilizirajući moment M_1 od repne površine na kraku y veći od destabilizirajućeg momenta M_2 na kraku x , takva situacija daje zrakoplovu pozitivnu statičku uzdužnu stabilnost. Na slici 7 se može vidjeti situacija neutralne statičke uzdužne stabilnosti, u kojoj je stabilizirajući moment M_1 jednak destabilizirajućem momentu M_2 zbog toga što se težište nalazi na poziciji neutralne točke. Na slici 8 može se vidjeti situacija u kojoj je destabilizirajući moment M_2 veći od stabilizirajućeg momenta M_1 zato što se težište zrakoplova nalazi iza neutralne točke. Takva situacija daje negativnu uzdužnu statičku stabilnost zrakoplova. Kako bi tijekom leta zrakoplov uvijek ostao stabilan, postoji pojam koji se zove *aft limit*, odnosno zadnja granica pozicije težišta, to je točka iza koje se težište ne smije naći kako bi uvijek tijekom leta imali pozitivnu stabilnost. Zadnji limit težišta se mora nalaziti ispred pozicije neutralne točke. Što je pozicija težišta više ispred pozicije neutralne točke to je zrakoplov stabilniji i to zrakoplov ima veću statičku marginu ili rezervu što je direktna mjera uzdužne statičke stabilnosti zrakoplova. Prednji limit težišta određen je djelotvornosti elevatora prilikom polijetanja, naime ako je težište pomaknuto previše naprijed elevator neće moći stvoriti dovoljnu silu kako bi stvorio dovoljan moment propinjanja da zrakoplov odlijepi na polijetanju [2, 3].



Slika 6. Pozitivna uzdužna statička stabilnost [3]



Slika 7. Neutralna uzdužna statička stabilnost [3]



Slika 8. Negativna uzdužna statička stabilnost [3]

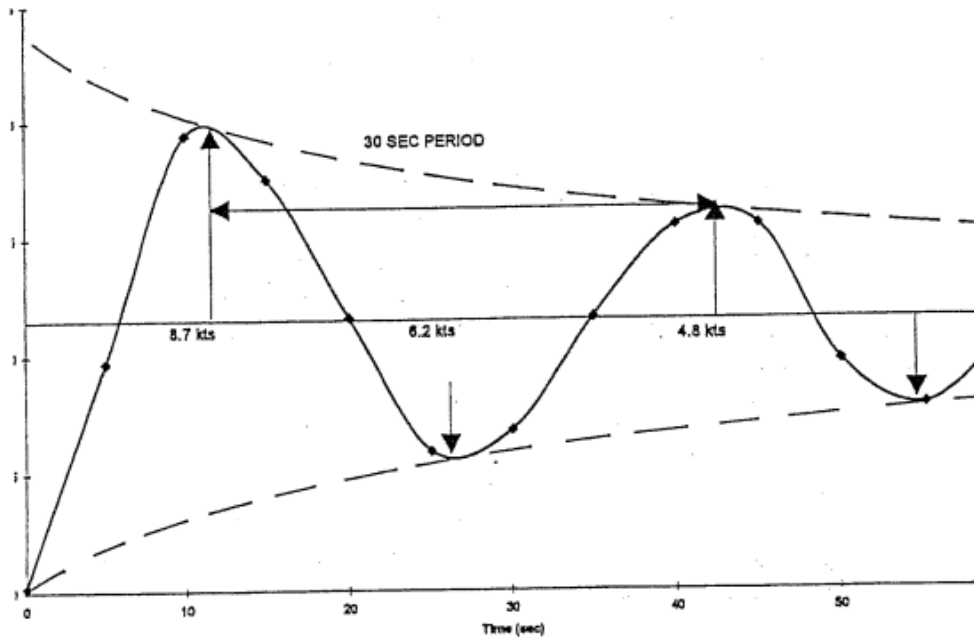
2.4. UZDUŽNA DINAMIČKA STABILNOST ZRAKOPLOVA

Uzdužna dinamička stabilnost zrakoplova je stanje u kojem gledamo kakav je odziv zrakoplova oko njegove lateralne osi, znači odziv momenta propinjanja i poniranja u nekom vremenskom periodu nakon što biva izbačen iz ravnotežnog stanja. Stupanj dinamičke uzdužne stabilnosti zrakoplova je određen periodom jedne oscilacije T i vremenom potrebnim da se amplituda smanji na pola početne vrijednosti $t/2$. Pri uzdužnom gibanju će se najviše promatrati brzina i visina zrakoplova u nekom vremenskom periodu. Također se pozornost može obratiti i na napadni kut i kut propinjanja. Uzdužna dinamička stabilnost zrakoplova se dijeli na:

- Kratkoperiodične oscilacije, odnosno gibanje koje se jako brzo priguši. Kod kratkoperiodičnih oscilacija brzina i visina su konstantne vrijednosti, period traje između jedne i dvije sekunde te pilot teško priguši ovakve oscilacije.
- Dugoperiodične oscilacije odnosno gibanje kojemu treba barem 30 sekundi da se priguši. Pri tome gibanju, napadni kut je skoro konstantan, period može trajati do dvije minute, a brzina, visina i kut propinjanja su varijabilne vrijednosti. Pilotu je ovakvo gibanje lako uočljivo i relativno lako ga priguši. Kod dugoperiodičnih oscilacija imamo stalnu izmjenu kinetičke energije u potencijalnu i obrnuto dok se gibanje ne priguši, jednostavnije rečeno kada zrakoplov penje brzina pada a visina raste, dok u poniranju brzina raste a visina pada. Na slici 9 može se vidjeti početak dugoperiodičnih oscilacija u kojemu je opisana ovisnost nagiba oko lateralne osi (*pitch*) u odnosu na vrijeme pri konstantnom napadnom kutu, ako se pretpostavi da je zrakoplov stabilan, amplituda bi se trebala smanjiti i vremenom doći na početnu vrijednost. Na slici 10 možemo vidjeti stabilni dugoperiodični mod u kojemu je opisana ovisnost brzine u odnosu na vrijeme, o čemu će se više govoriti u nastavku rada [2].



Slika 9. Dugoperiodični mod., ovisnost nagiba oko poprečne osi i vremena pri približno konstantnom napadnom kutu [2]



Slika 10. Dugoperiodični mod., ovisnost brzine i vremena [4]

3. KARAKTERISTIKE CESSNE 172

Zrakoplov kojim će se provoditi eksperiment ispitivanja uzdužne stabilnosti dugoperiodičnog moda i avion kojem će se ocjenjivati kvaliteta upravljanja kod dugoperiodičnog gibanja oko lateralne osi je Cessna 172. Točnije, koristiti će se Cessna 172, registracijske oznake 9A DMB iz 1987. godine, avion iz flote hrvatskog zrakoplovnog nastavnog središta, središta za obuku pilota studenata Fakulteta prometnih znanosti. Na slici 11 je prikazan navedeni avion [5].

Cessna 172 je američki visokokrilni jednomotorni zrakoplov sa četiri sjedala. Najpopularniji je to školski zrakoplov generalne avijacije na svijetu. Dio razloga leži u tome što je Cessna vrlo stabilan zrakoplov koji trpi velika naprezanja zbog njene izrade. Motor koji se nalazi s prednje strane utječe na položaj težišta koji je dosta pomaknut naprijed što stvara stabilizirajući moment, također Cessna ima krila savijena prema gore (*dihedralna*) visoka krila što je najbolja kombinacija za povećanje stabilnosti. Prvi let tim zrakoplovom je održan davne 1955. godine, a tisuće primjeraka lete još i danas. Mjereno po dugovječnosti i popularnosti, može se reći kako je Cessna 172 najuspješniji zrakoplov na svijetu. Također, Cessna 172 je i zrakoplov koji je proizveden u najviše primjeraka od bilo kojeg drugog zrakoplova na svijetu. Proizvedeno je preko 44000 primjeraka tog zrakoplova do 2015. godine, a proizvodi se i dan danas. Usporedbe radi, Boeing 737 je proizveden u nešto više od 11000 primjeraka [6].



Slika 11. Cessna 172, 9A-DMB [7]

3.1. OPĆE INFORMACIJE

Proizvođač zrakoplova prilikom njegove izrade ima zadatak zadovoljiti mnogo bitnih parametara kako bi zrakoplov dobio licencu plovidbenosti. Proizvođač izdaje dokument u pisanom obliku knjige koji se zove pilotska operativna knjiga (*Pilot Operating Handbook - POH*) pomoću kojega bi se piloti

trebali što bolje upoznati sa zrakoplovom. Prvo poglavlje navedenog POH-a Cessne 172, 9A-DMB, se odnosi na generalne informacije o avionu. Neke od najbitnijih su:

- Dimenzije: duljina 8,2 m, raspon krila 10,97 m, razmak između glavnih kotača 2,55 m, širina horizontalnog stabilizatora 3,45 m, visina 2,67 m, maksimalan promjer elise 1,9 m. Navedene dimenzije se mogu vidjeti na slici 12.
- Motor: četverocilindrični motor sa karburaturom, hlađen zrakom, zapremine 320 in³ snage 160 hp pri 2700 RPM.
- Gorivo: standardni spremnici goriva imaju kapacitet od 40 gal odnosno 151 L zrakoplovnog goriva.
- Ulje: kapacitet ulja 5,7 L. Minimalna količina za let 3,8 L.
- Masa: maksimalna masa za polijetanje iznosi 2300 lb, odnosno 1043 kg. Masa praznog aviona iznosi 1529 lb tj. 693,5 kg, ta masa radi moment od 60,6 lb·in na kraku od 39,61 in od referentne linije odnosno protupožarnog zida.
- Maksimalna masa u normalnoj kategoriji za polijetanje je 2300 lb a u ultra lakoj (*utility*) kategoriji 2000 lb [8].

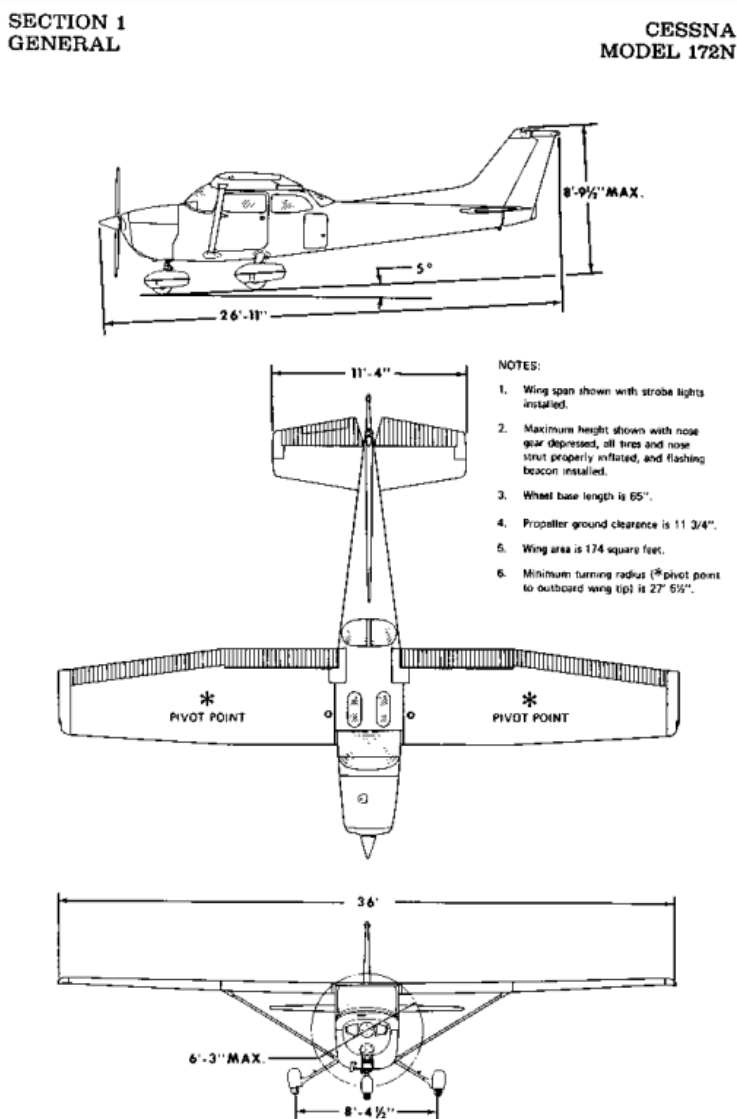


Figure 1-1. Three View

3.2. OGRANIČENJA

Svaki zrakoplov na svijetu ima svoje limitacije u pogledu raznih kategorija radi prevencije nesreća odnosno zbog sigurnosti. U nastavku će se prikazati bitne limitacije zrakoplova Cessna 172 koje utječu na uvjete testiranja i provedbu eksperimentalnog leta [8].

- Limitacije brzina: brzina koju nikada ne smijemo prekoračiti $V_{ne} = 160$ kn. Maksimalna strukturalna brzina za krstarenje $V_{no} = 128$ kn odnosno brzina koju smijemo prekoračiti jedino u mirnoj atmosferi i tada sa oprezom. Treća brzina je maksimalna brzina rađenja manevara odnosno brzina iznad koje ne smijemo raditi pune ili nagle otklone kontrola, ona uvelike ovisi o masi aviona $V_a (2300 \text{ lb}) = 97$ kn, $V_a (1950 \text{ lb}) = 89$ kn, $V_a (1600 \text{ lb}) = 80$ kn. Maksimalna brzina sa maksimalno izvučenim zakrilcima $V_{fe} = 85$ kn. Brzina sloma uzgona u čistoj konfiguraciji sa centrom težišta na prednjoj granici odnosno minimalna brzina na kojoj zrakoplov može letjeti $V_s = 47$ kn.
- Maksimalna brzina vrtnje motora = 2700 RPM.
- Maksimalna temperatura ulja = 245 °F tj. 118 °C.
- Maksimalan tlak ulja = 100 PSI.
- Raspon težišta u normalnoj kategoriji je od 38,5 in do 47,3 in iza referentne linije odnosno protupožarnog zida.
- Faktor opterećenja u normalnoj kategoriji ima vrijednosti od -1,52 g do 3,8 g u čistoj konfiguraciji, dok je raspon opterećenja u *utility* kategoriji od -1,76 g do 4,4 g [8].

3.3. PERFORMANSE ZRAKOPLOVA

Zrakoplovi su dizajnirani kako bi zadovoljili uvjete propisane od nadležnih tijela. Jedni od tih uvjeta su performanse zrakoplova prema kojima se zrakoplov svrstava u određene kategorije. Performanse proizvođač opisuje u POH-u kako bi pilot mogao znati što očekivati od zrakoplova u različitim uvjetima i konfiguracijama, odnosno kako bi mogao planirati letove sa određenom razinom preciznosti koja pomaže smanjenju troškova i podizanju razine sigurnosti zrakoplova. U nastavku će se opisati performanse zrakoplova Cessna 172, 9A-DMB u određenim uvjetima za određene brzine normalnih operacija koje su značajne za provedbu eksperimentalnog leta i leta općenito u svakodnevnim normalnim operacijama polijetanja, penjanja, krstarenja, spuštanja i slijetanja [8].

Performanse u polijetanju: U polijetanju treba izdvojiti brzinu od 55 kn koja se uzima kao brzina rotacije prilikom polijetanja. Dok zrakoplov dođe do te brzine prijeći će udaljenost od 600 do 1000 ft ovisno o raznim faktorima kao što su temperatura zraka, nadmorska visina ili masa na polijetanju.

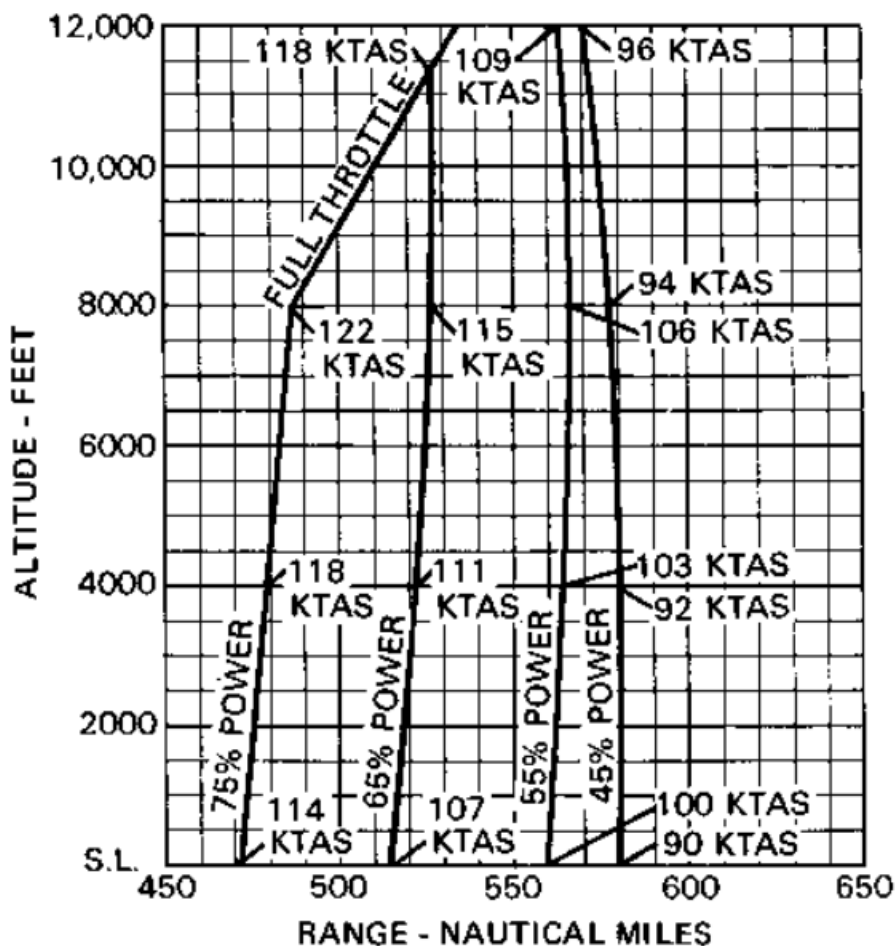
Performanse u penjanju: Kod penjanja se izdvaja brzina od okvirno 75 kn. Brzina od 75 kn je brzina najbržeg penjanja, ona uz maksimalnu raspoloživu snagu daje najviše prijeđene visine u najmanjem vremenskom periodu. Ta brzina također ovisi o raznim varijabilnim faktorima kao što su visina, masa ili temperatura. Maksimalna visina leta Cessne 172, 9A-DMB je 12000 ft.

Performanse u krstarenju: U krstarenju postoji nekoliko različitih postavki snage koje će dati različite brzine i performanse zrakoplova u određenim uvjetima. Normalno krstarenje se izvodi između 55 % i 75 % maksimalne raspoložive snage što bi dalo raspon brzina od 100 do 115 kn u uvjetima standardne atmosfere na razini mora. No isto tako postoji i postavka sa 45 % maksimalne raspoložive snage koja će u krstarenju dati brzinu s kojom će zrakoplov moći doletjeti najdalje i s

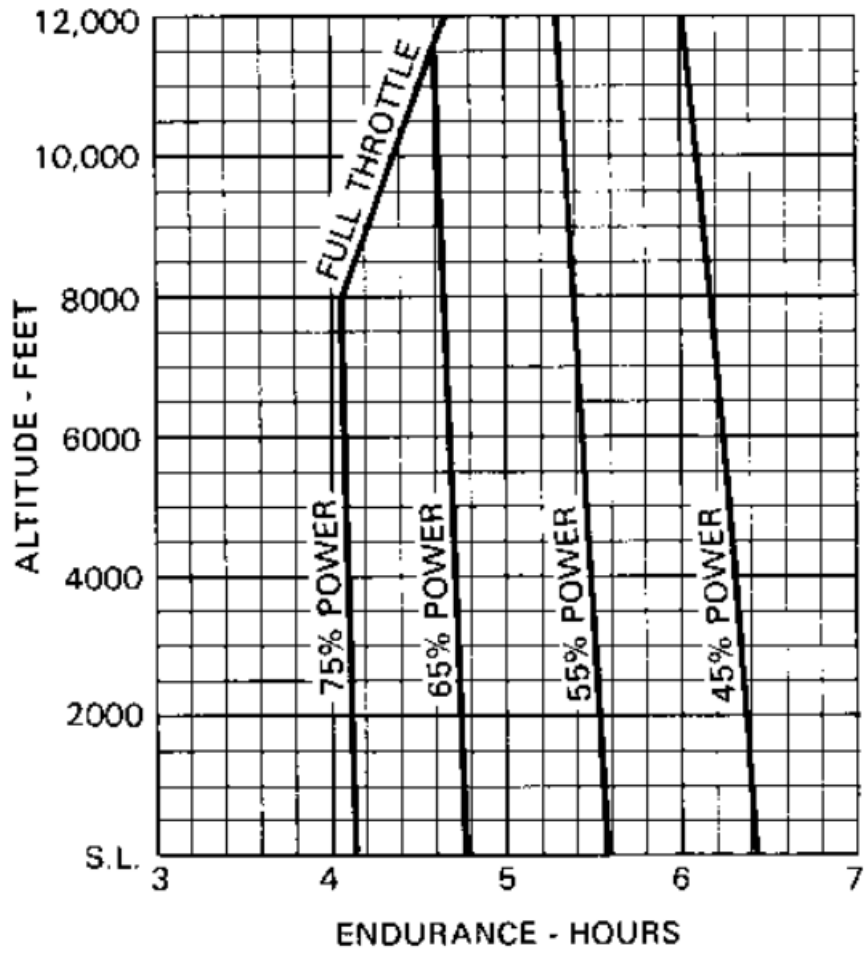
kojom će zrakoplov moći najduže ostati u zraku, to će biti brzina od 90 kn u uvjetima standardne atmosfere na razini mora. Navedene brzine su bitne u svakodnevnim operacijama ovog zrakoplova te su zbog toga bitne i za eksperimentalno određivanje stabilnosti dugoperiodičnog moda uzdužne stabilnosti ovoga zrakoplova. Na slici 13 možemo vidjeti dolet zrakoplova Cessna 172 sa navedenim brzinama, dok na slici 14 možemo vidjeti istrajnost zrakoplova u vezi sa navedenim brzinama. Te brzine su također ovisne o varijabilnim faktorima poput visine na kojoj zrakoplov krstari.

Performanse u spuštanju: U spuštanju, odnosno prilazu, brzina kojom Cessna 172 prilazi na slijetanje u svim konfiguracijama osim u konfiguraciji sa punim otklonom zakrilaca je brzina od 65 kn. Brzina od 65 kn je također bitna jer je to i brzina maksimalnog doleta u slučaju otkaza motora odnosno brzina koja će omogućiti najveći omjer koeficijenta uzgona C_L i koeficijenta otpora C_D , $(C_L/C_D)_{max}$. Taj omjer odnosno finesa Cessne 172, 9A-DMB, iznosi prema POH-u iz 1978.godine 9, što bi značilo da u slučaju otkaza motora na 1000 ft zrakoplov može prijeći horizontalne udaljenosti 9000 ft odnosno približno 1,5 NM.

Performanse u slijetanju: U slijetanju treba osim brzine prilaza već opisane svakako spomenuti i udaljenost koju zrakoplov prijeđe od dodira s pistom dok se ne zaustavi, ona može iznositi od 500 ft do 800 ft ovisno o temperaturi zraka i masi zrakoplova [8].



Slika 13. Dolet zrakoplova Cessna 172, 9A-DMB pri različitim brzinama, masi 2300 lb i standardnoj temperaturi [8]



Slika 14. Istrajnost zrakoplova Cessna 172, 9A-DMB pri različitim postavkama snage, masi 2300 lb i standardnoj temperaturi [8]

4. EKSPERIMENTALNI LET

U nastavku su opisani provedeni eksperimentalni let u svrhu dobivanja stvarnih podataka koji će pomoći u ocjenjivanju kvalitete upravljivosti i stabilnosti dugoperiodičnog moda uzdužnog gibanja zrakoplova Cessna 172. Let će biti test stabilnosti dugoperiodičnog gibanja zrakoplova Cessna 172. Održan je u skladu sa metodama za određivanje dinamičke stabilnosti dugoperiodičnog moda prema certifikatu specifikacija za normalne, ultra lake, akrobatske i prigradske avione (*Certification Specifications for Normal, Utility, Aerobatic, and Commuter Category Aeroplanes - CS-23*) dokumentu agencije europske unije za sigurnost zračnog prometa (*European Aviation Safety Agency - EASA*). Prema tome dokumentu let treba provesti na različitim brzinama i visinama, sukladno tomu eksperimentalni let će biti proveden na visinama 3000 ft i 5000 ft i brzinama od 90 kn i 100 kn [9].

4.1. POSTUPAK PROVEDBE EKSPERIMENTALNOG LETA

Dugoperiodični mod gibanja se u letu može relativno lagano ispitati. Prvo će se prikazati postupak ispitivanja metodom držane palice:

1. Zrakoplov koji testiramo se prvo uravnoteži na neku brzinu V_{trim} , odnosno dovede se u stanje za uravnoteženi let konstantnom brzinom u krstarenju gdje se pomoću trimera rastereti sila sa palice na određenoj brzini koja mora biti unutar envelope raspoloživih brzina za let.
2. Da bi se ispitala stabilnost metodom držane palice, treba se označiti ili markirati položaj palice potreban za održavanje uravnoteženog leta konstantnom brzinom.
3. Nakon toga se palica ili upravljač povuče ili gurne od sebe (za bolje i točnije rezultate oba načina rada će se prikazati) kako bi se zrakoplov maknuo od ravnotežnog položaja. Palicu se otkloni kako bi se brzina promijenila za oko 10 - 15 % brzine V_{trim} , ta brzina će biti označena kao V_0 . Na toj brzini se palica zadrži par sekundi.
4. Pomicanje palice treba izvesti nježno, tako da maksimalna uznemirenost odnosno vertikalna brzina ne prelazi 1800 ft/min.
5. U trenutku kada se postigne željena brzina V_0 palica se vraća na markirano mjesto za brzinu uravnoteženog leta i tamo se zadržava rukom odnosno fiksira.
6. Štoperica se pali u trenutku kada se palica fiksira nazad na mjesto za ravnotežnu brzinu.
7. Bilježe se maksimalne i minimalne brzine kod oscilacija i vrijeme kada su se one desile. Također se bilježe visina zrakoplova, vanjska temperatura i brzina vrtnje motora [10, 4].

U pristupu sa slobodnom palicom koji će se isto ispitati, potrebno je nakon dostizanja brzine V_0 vratiti palicu u položaj za brzinu uravnoteženog leta markiran naljepnicom te je potom pustiti kako bi kontrole slobodno oscilirale. Štoperica će se upaliti u trenutku kada se ruka makne sa palice odnosno kada kontrole krenu slobodno oscilirati. Ostatak procedure ostaje nepromijenjen u odnosu na metodu držane palice. Kod metode sa slobodnom palicom se mogu očekivati veće oscilacije i duže osciliranje oko ravnotežne brzine pošto je taj način nestabilniji od metode sa fiksnom palicom [11].

Također treba napomenuti kako je bitno paziti da se prilikom eksperimenta ne prijeđu nikakva ograničenja zrakoplova kao što su faktor opterećenja (*load factor*) ili neke limitacijske brzine kao što su V_{ne} ili V_{stall} koje bi mogle ugroziti sigurnost aviona. Regulatorica EASA-e o ispitivanju stabilnosti također propisuje kako maksimalna brzina u horizontalnom letu ne smije prelaziti V_h odnosno maksimalnu brzinu u horizontalnome letu sa maksimalnom kontinuiranom snagom. Za što bolje

rezultate, procedura bi se trebala ponoviti na različitim brzinama unutar envelope raspoloživih brzina za let te na različitim visinama [9].

4.2. PLANIRANJE EKSPERIMENTALNOG LETA

Kako bi eksperiment bio što realniji i kako bi ocjena kvalitete upravljivosti i stabilnosti bila što bolje shvaćena razne vrste podataka će se koristiti i uzeti u obzir prilikom rađenja eksperimenta. Također će se dobiti razni rezultati iz kojih će se crtati grafovi koji će se uspoređivati sa teorijskim rješenjima dugoperiodičnog gibanja.

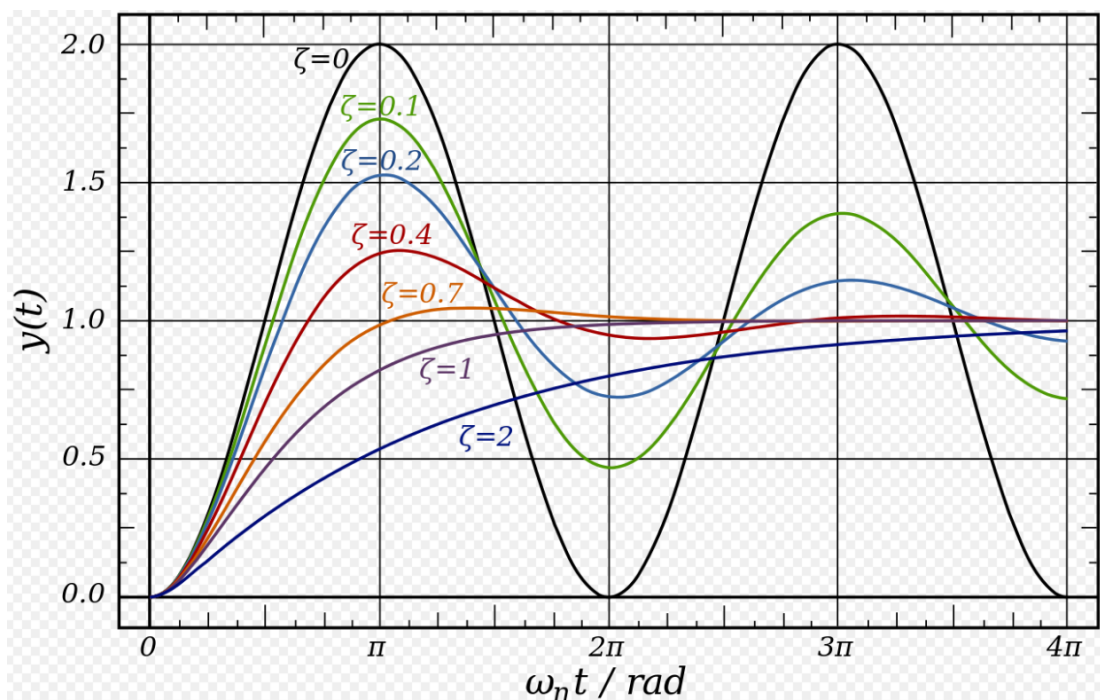
Prvi podaci, najbitniji kod ispitivanja stabilnosti, biti će bilješke o maksimalnim i minimalnim brzinama i vremenu u kojemu se događaju. Brzine na kojima će se ispitivati stabilnost biti će 90 i 100 kn, tj. brzine koje piloti Cessne 172 najčešće koriste. Prema POH-u 90 kn je brzina u horizontalnome letu sa postavkom snage od 45 % odnosno brzina za najdulji dolet i najveću istrajnost. Brzina od 100 kn je prema POH-u normalna brzina krstarenja za koju bi se trebalo trošiti 55 %. Također, kako bi se zadovoljili uvjeti regulative EASA - e za ispitivanje dinamičke stabilnosti dugoperiodičnog moda zrakoplova, eksperiment će se provesti i na različitim visinama od 3000 i 5000 ft prema tlaku zraka od 1013 hPa [8].

Preko dobivenih podataka o maksimalnim i minimalnim brzinama u određenom vremenskom trenutku se može odrediti $V-t$ graf iz kojega će biti vidljive oscilacije oko ravnotežne brzine našeg zrakoplova. Iz tog grafa će se odrediti podatak o periodu T , što je vrijeme potrebno za jedan ciklus oscilacija odnosno vrijeme između dvije maksimalne amplitude ili dva vrha na grafu. Također će se iz navedenog $V-t$ grafa moći odrediti i mjera relativne tendencije prigušenja oscilatornog gibanja $t/2$, odnosno vrijeme potrebno da se amplituda priguši na pola vrijednosti. Te eksperimentalne vrijednosti se kasnije mogu usporediti sa teorijskim vrijednostima dobivenim matematičkim izračunima [9, 10, 8].

Iz $V-t$ grafa se može također izvući omjer dvije susjedne amplitude, preko kojeg se može doći do podatka koji se zove faktor prigušenja ζ (*damping factor, damping ratio*). Faktor prigušenja je broj koji govori koliko prebačaja ima naše oscilatorno gibanje u nekom vremenskom periodu odnosno tijekom oscilatornog gibanja. Drugim riječima faktor prigušenja ili omjer prigušenja je broj koji govori koliko dobro se amplitude prigušuju. Taj faktor može poslužiti kao usporedba stabilnosti. Na slici 15 možemo vidjeti kako se mijenja izgled krivulje i amplituda ovisno o veličini faktora prigušenja. Treba naglasiti da faktor prigušenja nije isto što i sam pojam prigušenje, prigušenje je obrnuto proporcionalno vremenu potrebnom da se neko gibanje priguši, odnosno što je prigušenje veće potrebno vrijeme za to prigušenje je manje [4].

Podaci koji će se bilježiti u eksperimentalnom letu, koji će se upisivati u tablicu su i brzina vrtnje motora, visine po tlaku od 1013 hPa u trenutku bilježenja brzina i vanjska temperatura zraka. Masa preostalog goriva u spremnicima u trenutku rađenja pojedinog testa i položaj težišta u tom trenutku odnosno njegova odmaknutost od referentne linije u inčima su podaci koji će se pomoću ulaznih podataka naknadno izračunati i također upisati u tablicu. Manja masa goriva odnosno njegovo trošenje tokom leta utjecat će na pomicanje težišta više naprijed prema referentnoj liniji odnosno protupožarnom zidu, što bi u slučaju velikog pomicanja težišta djelovalo na stabilnost tako da bi poboljšalo longitudinalnu stabilnost zrakoplova. Svi ti podaci će se mjeriti kako bi se što vjernije prikazali rezultati i možda tražili razlozi eventualnih odstupanja od teoretskih izračuna. Među tim

varijabilnim podacima posebna pažnja se treba posvetiti meteorološkoj situaciji koja najviše od svih može utjecati na dobivene rezultate i na razlike između prakse i teorije [10, 4, 8].



Slika 15. Faktor prigušenja, različite vrijednosti [12]

4.3. TABLICE I REZULTATI EKSPERIMENTALNOG LETA

Eksperimentalni let proveden je 16.7.2022. godine sa početkom u 12:27 po lokalnom vremenu. Dio leta u kojem se ispitivala stabilnost dugoperiodičnog gibanja trajao je do 14h. Let je proveden na zrakoplovu Fakulteta prometnih znanosti Cessna 172, 9A-DMB. Mjesto polijetanja je bio aerodrom Varaždin, a dio leta u kojemu provodio eksperiment odvio se u zoni iznad Ludbrega na visinama od 3000 i 5000 ft po tlaku zraka od 1013 hPa. Na slici 16 se može vidjeti dokument težine i balansiranja koji prikazuje stvarne mase i momente u zrakoplovu u trenutku polijetanja. Podaci koji su se bilježili rukom prikazani su naknadno u tablicama 1, 2, 3 i 4. Tokom leta bilježili su se: brzina V , trenutak mjerenja te brzine t , visine h , vanjska temperatura OAT i brzina vrtnje motora u horizontalnom letu pri ravnotežnoj brzini. Količina preostalog goriva u spremnicima u trenutku rađenja određenog testa i pozicija težišta odnosno njegova odmaknutost od referentne linije su unesene naknadno poslije izračuna navedenih veličina.

Što se meteorološke situacije tiče, tog dana je područje našeg leta bilo u polju blago povišenog tlaka zraka koji je dolazio sa sjeverozapada, tlak je iznosio 1020 hPa. Temperatura na površini zemlje u vrijeme našeg leta iznosila je 28 °C dok je temperatura na 3000 ft bila 18 °C, a na 5000 ft je iznosila 15 °C. Naoblaka je bila nekoliko – raspršeno (*few – scattered – FEW – SCT*) tj. dvije do tri osmine prekrivenosti neba kumulom naoblakom između 3500 i 5000 ft. Atmosfera je bila relativno nestabilna praćena razvijanjem konvektivnih oblaka kumulusa, dokaz te nestabilnosti u nižim slojevima je i povećan temperaturni gradijent od zemlje do 3000 ft koji je tog dana iznosio čak 3,3 °C. Bitno je

naglasiti da su se na 3000 ft značajno su se osjetila vertikalna uzlazno silazna strujanja zbog razvijanja kumulusa, dok je na 5000 ft atmosfera bila osjetljivo mirnija, no ne i u potpunosti mirna i stabilna. Takva strujanja mogu najviše utjecati na amplitude koje će zrakoplov imati tijekom testa, a one se najviše osim kod promjene brzina mogu vidjeti na promjeni visine zrakoplova. Vjetar na 3000 ft iznosio je 040°/5 kn, dok je na 5000 ft bio 060°/7 kn.



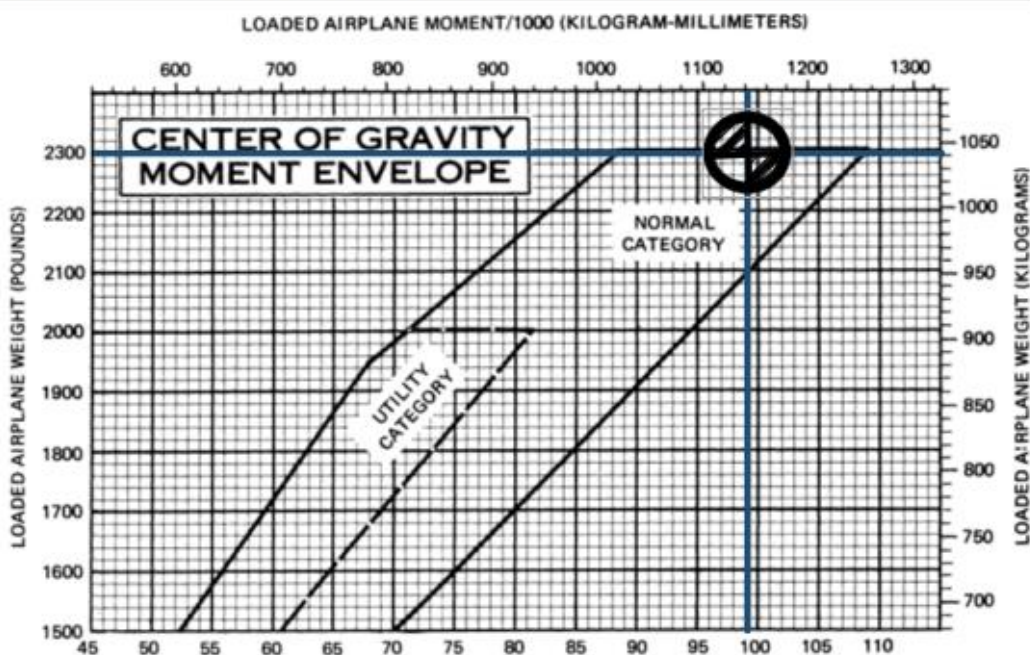
W&B C-172N

1/1

In accordance with POH (AFM) Cessna 172N Section 6; Pages 6-9, 6-11

Registration	Date	Pilot	Signature
9A-DMB	16.07.2022.	Marko Bošnjak	
Loading	Mass [lb]	CG arm [in]	Moment [lb-in/1000]
BEM (use data pertaining to specific airplane)	1528,9	39,61	60,6
Usable fuel (6 lb/gal) standard tanks /40 gal max	240	47,9	11,5
Pilot and Front PAX	352	37,1	13,0
Rear PAX	176	72,9	12,8
*Baggage Area 1 /120 lb max	7	94,8	0,7
*Baggage Area 2 /50 lb max		140,0	
Ramp Mass/Moment	2303,9	-	98,61
Fuel allowance for start, taxi and run-up	-7	47,9	-0,3
TOM /2300 lb max	2296,9	-	98,9

*The maximum allowable combined mass capacity for the baggage area 1 is 120 lb and for the baggage area 2 is 50 lb



Slika 16. W&B, Cessna 172, 9A-DMB [13]

Tablica broj 1 pokazuje rezultate eksperimentalnog leta kojim su se ispitivale dugoperiodične oscilacije Cessne 172 oko lateralne osi. Prije svake vrste testa zrakoplov je doveden u ravnotežni let brzine 90 kn i na visinu od 3000 ft gdje bi se prvo uravnotežio i gdje bi se putem trimera maknula sila sa palice za brzinu od 90 kn i visinu od 3000 ft što bi bili ulazni podaci za sve četiri vrste testa prokazane u tablici 1. U tim uvjetima provedeni su testovi metodom držane i slobodne palice koji su prikazani jedni pored drugih kako bi se mogli lakše usporediti. Također su provedena testiranja sa otklonom na manju 75 kn i veću 105 kn početnu brzinu od ravnotežne brzine. Dobiveni rezultati brzina, vremena tih brzina, visina kod tih brzina, brzine vrtnje motora i vanjske temperature zabilježeni su u trenutku rađenja eksperimenta dok su podaci o količini preostalog goriva i poziciji težišta uneseni naknadno nakon računskih radnji na temelju podataka prikupljenih na letu.

Tablica 1. Zabilježeni podaci sa eksperimentalnog leta za određivanje dugoperiodičnog moda sa ulaznim podacima od 90 kn i 3000 ft metodama držane i slobodne palice

$V_{trim} = 90 \text{ kn}$ $h = 3000 \text{ ft}$												
	držana palica $V_0 = 75 \text{ kn}$			držana palica $V_0 = 105 \text{ kn}$			slobodna palica $V_0 = 75 \text{ kn}$			slobodna palica $V_0 = 105 \text{ kn}$		
Broj mjerjenja:	V (kn)	t (s)	h (ft)	V (kn)	t (s)	h (ft)	V (kn)	t (s)	h (ft)	V (kn)	t (s)	h (ft)
0	75	0	3100	105	0	2760	75	0	3180	105	0	2740
1	110	11	2900	81	14	2920	98	14	3000	72	15	2940
2	80	24	2980	95	23	2880	78	25	3050	102	28	2840
3	104	40	2800	88	33	2900	94	37	3020	75	39	2930
4	83	69	2960	91	38	2900	82	53	3040	97	53	2870
5	104	89	2920				91	65	3030	82	67	2900
6	85	97	2960							90	80	2920
7	94	104	2940									
C.G. (in)	42,75			42,74			42,74			42,75		
Fuel (lb)	226			217			215			212		
OAT (°C)	18			18			18			18		
RPM	2300			2300			2300			2300		

Tablica broj 2 pokazuje rezultate eksperimentalnog leta kojim su se ispitivale dugoperiodične oscilacije Cessne 172 oko lateralne osi. Prije svake vrste testa zrakoplov je doveden u ravnotežni let brzine 90 kn i na visinu od 5000 ft gdje bi se prvo uravnotežio i gdje bi se putem trimera maknula sila sa palice za brzinu od 90 kn i visinu od 5000 ft što bi bili ulazni podaci za sve četiri vrste testa prokazane u tablici 2. U tim uvjetima provedeni su testovi metodom držane i slobodne palice koji su prikazani jedni pored drugih kako bi se mogli lakše usporediti. Također su provedena testiranja sa otklonom na manju 75 kn i veću 105 kn početnu brzinu od ravnotežne brzine. Dobiveni rezultati brzina, vremena tih brzina, visina kod tih brzina, brzine vrtnje motora i vanjske temperature

zabilježeni su u trenutku rađanja eksperimenta dok su podaci o količini preostalog goriva i poziciji težišta uneseni naknadno nakon računskih radnji na temelju podataka prikupljenih na letu.

Tablica 2. Zabilježeni podaci sa eksperimentalnog leta za određivanje dugoperiodičnog moda sa ulaznim podacima od 90 kn i 5000 ft metodama držane i slobodne palice

$V_{trim} = 90 \text{ kn}$ $h = 5000 \text{ ft}$												
	držana palica $V_0 = 75 \text{ kn}$			držana palica $V_0 = 105 \text{ kn}$			slobodna palica $V_0 = 75 \text{ kn}$			slobodna palica $V_0 = 105 \text{ kn}$		
Broj mjerjenja:	V (kn)	t (s)	h (ft)	V (kn)	t (s)	h (ft)	V (kn)	t (s)	h (ft)	V (kn)	t (s)	h (ft)
0	75	0	5080	105	0	4420	75	0	5060	105	0	4860
1	109	18	4850	88	28	4500	106	13	4740	72	15	5080
2	85	38	4920	101	45	4480	84	30	4880	100	27	4900
3	101	55	4850	84	63	4560	103	44	4700	79	42	5060
4	88	78	4840	101	82	4420	89	60	4800	94	57	4940
5	94	90	4840	87	100	4440	97	75	4660	82	75	5060
6	90	100	4840	90	122	4480	90	93	4680	93	88	5020
7										83	101	5100
8										90	115	5060
C.G. (in)	42,70			42,67			42,66			42,67		
Fuel (lb)	189			186			184			181		
OAT (°C)	15			15			15			15		
RPM	2400			2400			2400			2400		

Tablica broj 3 pokazuje rezultate eksperimentalnog leta kojim su se ispitivale dugoperiodične oscilacije Cessne 172 oko lateralne osi. Prije svake vrste testa zrakoplov je doveden u ravnotežni let brzine 100 kn i na visinu od 3000 ft gdje bi se prvo uravnotežio i gdje bi se putem trimera maknula sila sa palice za brzinu od 100 kn i visinu od 3000 ft što bi bili ulazni podaci za sve četiri vrste testa prokazane u tablici 3. U tim uvjetima provedeni su testovi metodom držane i slobodne palice koji su prikazani jedni pored drugih kako bi se mogli lakše usporediti. Također su provedena testiranja sa otklonom na manju 85 kn i veću 115 kn početnu brzinu od ravnotežne brzine. Dobiveni rezultati brzina, vremena tih brzina, visina kod tih brzina, brzine vrtnje motora i vanjske temperature zabilježeni su u trenutku rađanja eksperimenta dok su podaci o količini preostalog goriva i poziciji težišta uneseni naknadno nakon računskih radnji na temelju podataka prikupljenih na letu.

Tablica 3. Zabilježeni podaci sa eksperimentalnog leta za određivanje dugoperiodičnog moda sa ulaznim podacima od 100 kn i 3000 ft metodama držane i slobodne palice

$V_{trim} = 100 \text{ kn}$ $h = 3000 \text{ ft}$												
	držana palica $V_0 = 85 \text{ kn}$			držana palica $V_0 = 115 \text{ kn}$			slobodna palica $V_0 = 85 \text{ kn}$			slobodna palica $V_0 = 115 \text{ kn}$		
Broj mjerjenja:	V (kn)	t (s)	h (ft)	V (kn)	t (s)	h (ft)	V (kn)	t (s)	h (ft)	V (kn)	t (s)	h (ft)
0	85	0	3150	115	0	2890	85	0	3150	115	0	2810
1	122	15	2750	91	19	2960	111	16	3100	91	18	2910
2	93	35	2890	108	33	2940	92	32	3130	106	35	2900
3	113	52	2700	100	77	2830	102	45	3110	95	54	2910
4	96	72	2740				93	67	3190	107	67	2810
5	106	87	2680				106	78	3180	91	88	2860
6	103	110	2680				90	97	3360	109	106	2690
7							105	108	3340	95	125	2720
8							94	125	3360	109	135	2640
9							105	140	3310	99	147	2660
10							94	157	3320	101	157	2660
11							102	175	3300			
C.G. (in)	42,72			42,71			42,72			42,69		
Fuel (lb)	209			205			202			199		
OAT (°C)	18			18			18			18		
RPM	2500			2500			2500			2500		

Tablica broj 4 pokazuje rezultate eksperimentalnog leta kojim su se ispitivale dugoperiodične oscilacije Cessne 172 oko lateralne osi. Prije svake vrste testa zrakoplov je doveden u ravnotežni let brzine 100 kn i na visinu od 5000 ft gdje bi se prvo uravnotežio i gdje bi se putem trimera maknula sila sa palice za brzinu od 100 kn i visinu od 5000 ft što bi bili ulazni podaci za sve četiri vrste testa prokazane u tablici 4. U tim uvjetima provedeni su testovi metodom držane i slobodne palice koji su prikazani jedni pored drugih kako bi se mogli lakše usporediti. Također su provedena testiranja sa otklonom na manju 85 kn i veću 115 kn početnu brzinu od ravnotežne brzine. Dobiveni rezultati brzina, vremena tih brzina, visina kod tih brzina, brzine vrtnje motora i vanjske temperature zabilježeni su u trenutku rađanja eksperimenta dok su podaci o količini preostalog goriva i poziciji težišta uneseni naknadno nakon računskih radnji na temelju podataka prikupljenih na letu.

Tablica 4. Zabilježeni podaci sa eksperimentalnog leta za određivanje dugoperiodičnog moda sa ulaznim podacima od 100 kn i 5000 ft metodama držane i slobodne palice

$V_{trim} = 100 \text{ kn}$ $h = 5000 \text{ ft}$												
	držana palica $V_0 = 85 \text{ kn}$			držana palica $V_0 = 115 \text{ kn}$			slobodna palica $V_0 = 85 \text{ kn}$			slobodna palica $V_0 = 115 \text{ kn}$		
Broj mjerjenja:	V (kn)	t (s)	h (ft)	V (kn)	t (s)	h (ft)	V (kn)	t (s)	h (ft)	V (kn)	t (s)	h (ft)
0	85	0	5100	115	0	4830	85	0	5100	115	0	4870
1	112	16	4940	82	17	5100	108	15	4950	88	19	5100
2	93	35	5070	110	34	4860	92	32	5100	107	42	5000
3	108	53	4950	95	52	5040	107	54	4920	90	53	5070
4	100	67	4990	100	67	5000	90	71	5100	104	68	4980
5							103	84	5000	92	85	5030
6							97	96	5070	103	98	4980
7							100	118	5030	96	114	5030
8										100	131	5000
C.G. (in)	42,67			42,63			42,62			42,61		
Fuel (lb)	179			176			172			168		
OAT (°C)	15			15			15			15		
RPM	2550			2550			2550			2550		

4.4. GRAFOVI I ZNAČAJNI PODACI EKSPERIMENTALNOG LETA

Grafovi koji će se analizirati u nastavku biti će $V-t$ grafovi. Na grafovima će se prikazati promjena brzine u nekom vremenskom periodu t , tako će se dobiti krivulja koja će opisati longitudinalnu stabilnost dugoperiodičnog moda Cessne 172 u realnim uvjetima opisanim u prethodnim poglavljima. Plava krivulja na grafovima opisuje osciliranje brzine zrakoplova u vremenu t koje je potrebno da se zrakoplov vrati natrag u ravnotežu odnosno da mu brzina prestane oscilirati. Ta krivulja pokazuje na koji način se zrakoplov vraća ili ne vraća u ravnotežno stanje, koliko vremena mu je potrebno odnosno kako on reagira kada uđe u poremećen položaj odmaknut od njegovog ravnotežnog položaja za neku vrijednost. Prva točka na plavoj krivulji je brzina V_0 , brzina manja ili veća za 15 kn od ravnotežne brzine, odnosno početna vrijednost sa koje se stabilnost zrakoplova ispituje. Zadnja točka na plavoj krivulji je brzina na kojoj se zrakoplov ustabilio. Žuta linija na grafovima predstavlja ravnotežnu brzinu, brzinu koju je zrakoplov imao u ravnotežnom horizontalnom letu prije poremećaja. To je linija oko koje bi se u savršenim uvjetima oscilacije trebale događati i na koju bi se vrijednost na kraju dugoperiodičnog moda zrakoplov trebao vratiti. Iz grafova će također biti određene značajne vrijednosti kao što su: period T , omjer amplituda u pola ciklusa (*half cycle amplitude ratio*), faktor prigušenja ζ i mjera relativne tendencije prigušenja oscilatornog gibanja $t/2$.

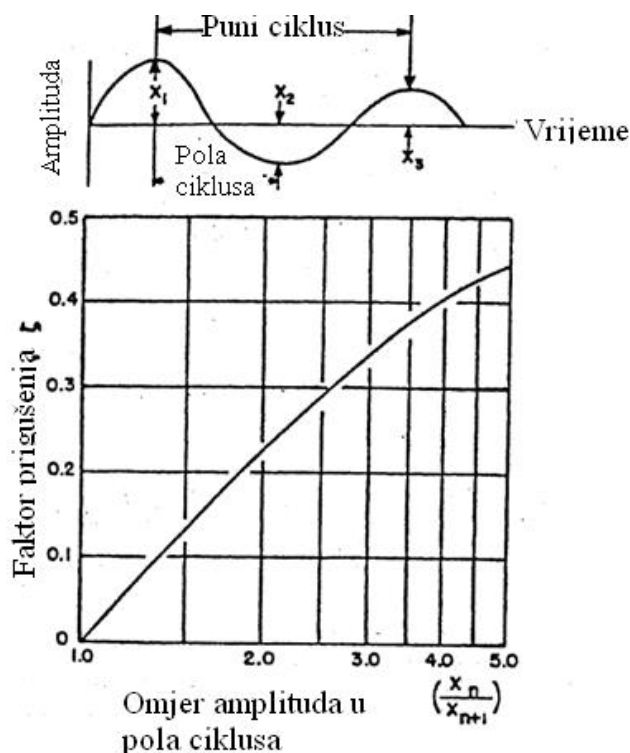
Period T je vrijeme potrebno za jedan ciklus oscilacija odnosno vrijeme između dvije maksimalne amplitude ili dva vrha na grafu. Pošto su vrijednosti iz grafova nepravilne zbog raznih varijabilnih

faktora kao što su meteorološki uvjeti, iz grafova će se određivati prosječni period. On će se dobiti tako da će se zbrojiti svi pojedinačni periodi na grafu te će se taj zbroj podijeliti sa brojem perioda koji su se zbrajali, tako će se dobiti jedan prosječan ili srednji period za određeni grafikon.

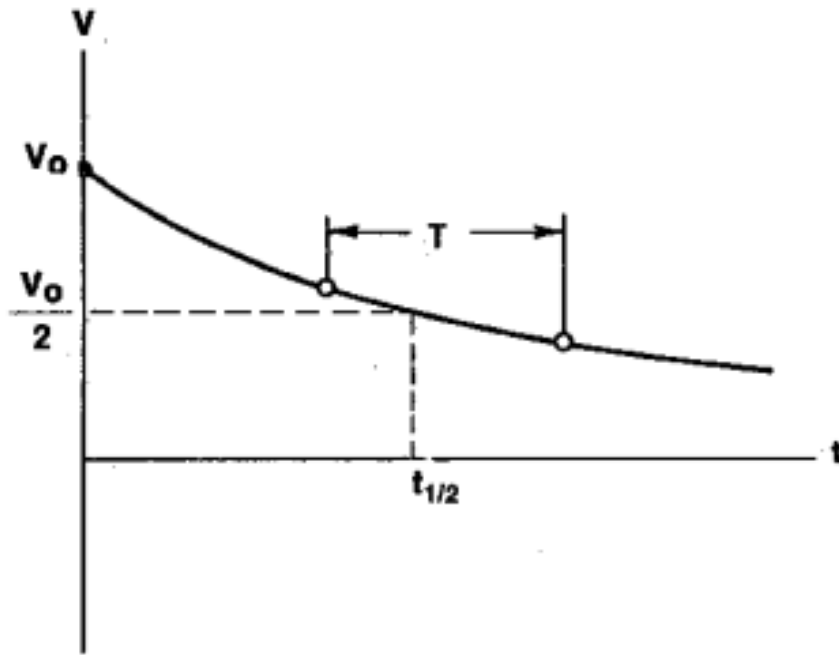
Omjer amplituda u pola ciklusa (X_n)/(X_{n+1}) prikazan je na gornjem dijelu slike 17. zbog nepravilnog tj. nestalnog dugoperiodičnog moda također će biti potrebno odrediti sve omjere amplituda na grafu kako bi se dobia jedna aritmetička sredina odnosno jedna prosječna ili srednja vrijednost omjera amplituda u pola ciklusa. To će biti vrijednost preko koje će se, prema slici 17, odrediti i faktor prigušenja. Srednja vrijednost omjera amplituda se dobije tako da se iz grafa iščita vrijednost koliko je „brijeg“ odnosno amplituda jedan odmaknuta od ravnotežne brzine. Ta vrijednost se podjeli sa vrijednosti koliko je „dol“ odnosno amplituda pored brijega tj. amplituda dva odmaknuta od ravnotežne brzine. Postupak se ponovi za sve amplitude na grafu te se ukupan rezultat podijeli sa brojem faktora koji su se zbrajali kako bi se dobila aritmetička sredina odnosno neka srednja vrijednost omjera amplituda u pola ciklusa.

Faktor prigušenja ζ ili omjer prigušenja je broj koji govori koliko dobro se amplitude prigušuju. Na slici 17 je prikazan graf iz kojega se preko vrijednosti omjera amplituda u pola ciklusa dobije faktor odnosno omjer prigušenja.

mjera relativne tendencije prigušenja oscilatornog gibanja $t/2$ je vrijeme potrebno da se amplituda priguši na pola vrijednosti. $t/2$ se određuje tako da se povuče tangenta koja prolazi kroz sve amplitude na grafikonu. Također se povuče druga linija koja će označavati vrijednost $V_0/2$, na kraju gdje se sijeku te dvije linije tamo se na x osi očita vrijednost koja predstavlja $t/2$. Na slici 18 prikazan je način po kojemu se određuje $t/2$ [10, 4].



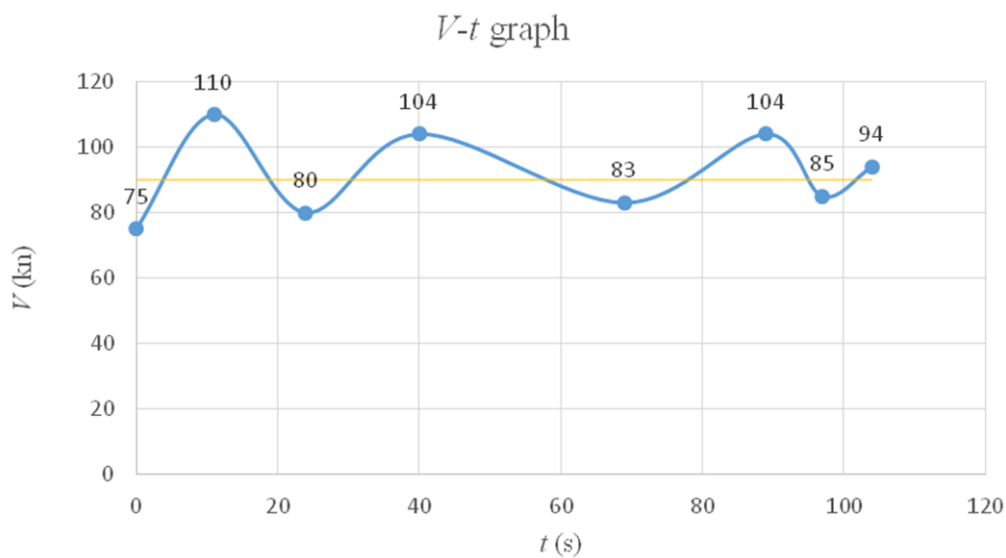
Slika 17. Prikaz određivanja omjera amplituda u pola ciklusa i prikaz dobivanja faktora prigušenja [4]



Slika 18. Način određivanja $t/2$ [10]

Na slici 19 može se vidjeti $V-t$ graf dugoperiodičnog moda Cessne 172 metodom držane palice sa ulaznim podacima: $V_{trim} = 90$ kn, $h = 3000$ ft, $V_0 = 75$ kn

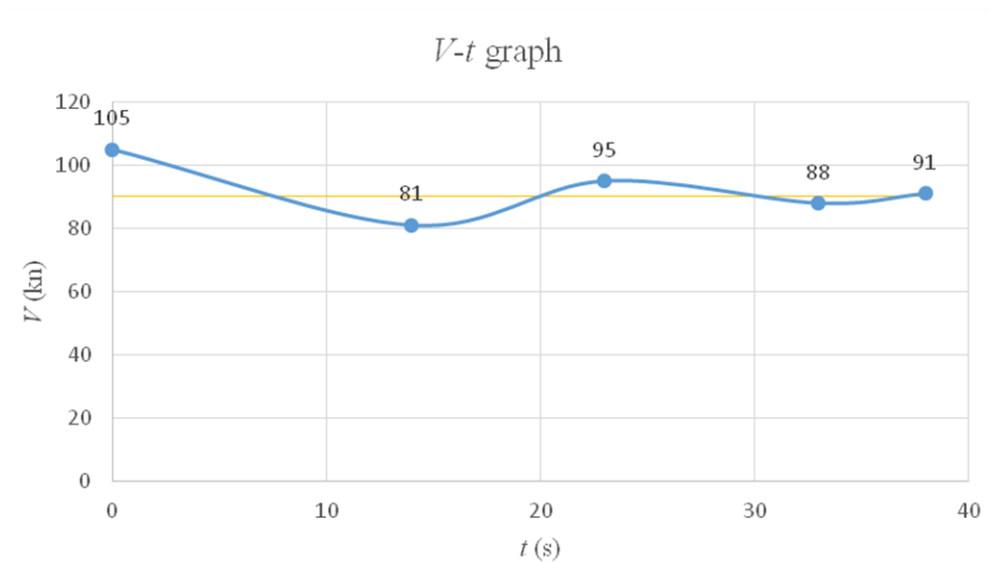
Graf slike 19 prikazuje gibanje od 104 sekunde, završnu ravnotežnu brzinu od 94 kn i visinu 2940 ft. Također je moguće očitati i sljedeće vrijednosti: $T = 32$ s, $\zeta = 0,12$, $t/2 = 62$ s



Slika 19. Graf dugoperiodičnog moda Cessne 172, $V_{trim} = 90$ kn, $h = 3000$ ft, $V_0 = 75$ kn, metoda držane palice

Na slici 20 može se vidjeti $V-t$ graf dugoperiodičnog moda Cessne 172 metodom držane palice sa ulaznim podacima: $V_{trim} = 90$ kn, $h = 3000$ ft, $V_0 = 105$ kn

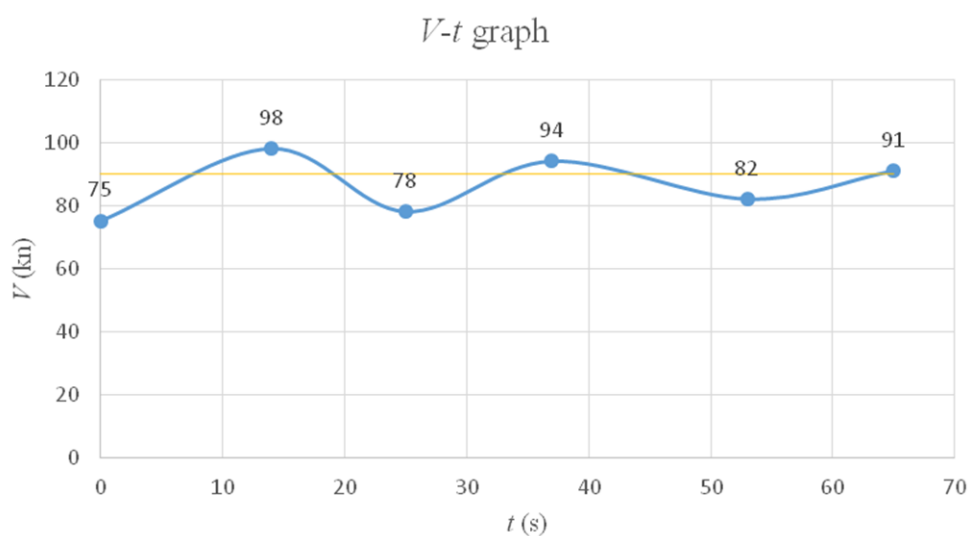
Graf slike 20 prikazuje gibanje od 38 sekundi, završnu ravnotežnu brzinu od 91 kn i visinu 2900 ft. Također je moguće očitati i sljedeće vrijednosti: $T = 19$ s, $\zeta = 0,21$, $t/2 = 17$ s



Slika 20. Graf dugoperiodičnog moda Cessne 172, $V_{trim} = 90$ kn, $h = 3000$ ft, $V_0 = 105$ kn, metoda držane palice

Na slici 21 može se vidjeti $V-t$ graf dugoperiodičnog moda Cessne 172 metodom slobodne palice sa ulaznim podacima: $V_{trim} = 90$ kn, $h = 3000$ ft, $V_0 = 75$ kn

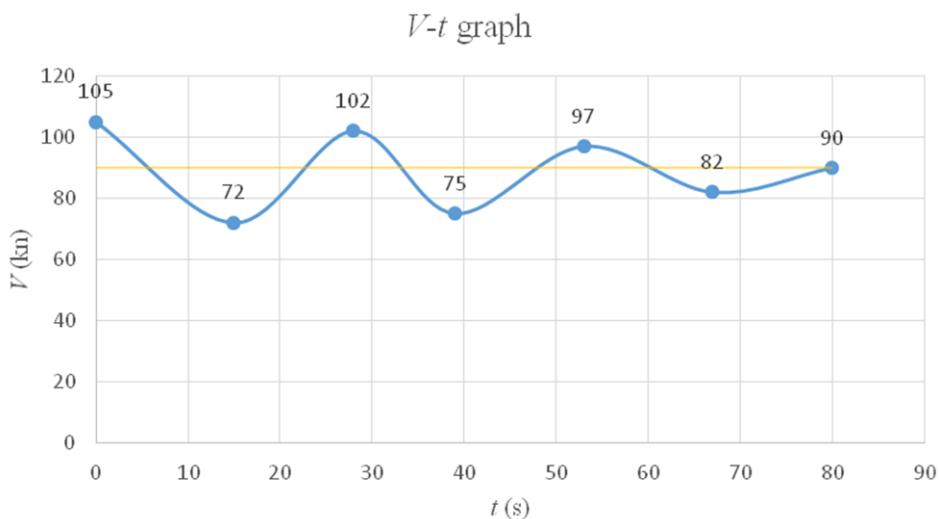
Graf slike 21 prikazuje gibanje od 65 sekundi, završnu ravnotežnu brzinu od 91 kn i visinu 3030 ft. Također je moguće očitati i sljedeće vrijednosti: $T = 26$ s, $\zeta = 0,12$, $t/2 = 55$ s



Slika 21. Graf dugoperiodičnog moda Cessne 172, $V_{trim} = 90$ kn, $h = 3000$ ft, $V_0 = 75$ kn, metoda slobodne palice

Na slici 22 može se vidjeti $V-t$ graf dugoperiodičnog moda Cessne 172 metodom slobodne palice sa ulaznim podacima: $V_{trim} = 90$ kn, $h = 3000$ ft, $V_0 = 105$ kn

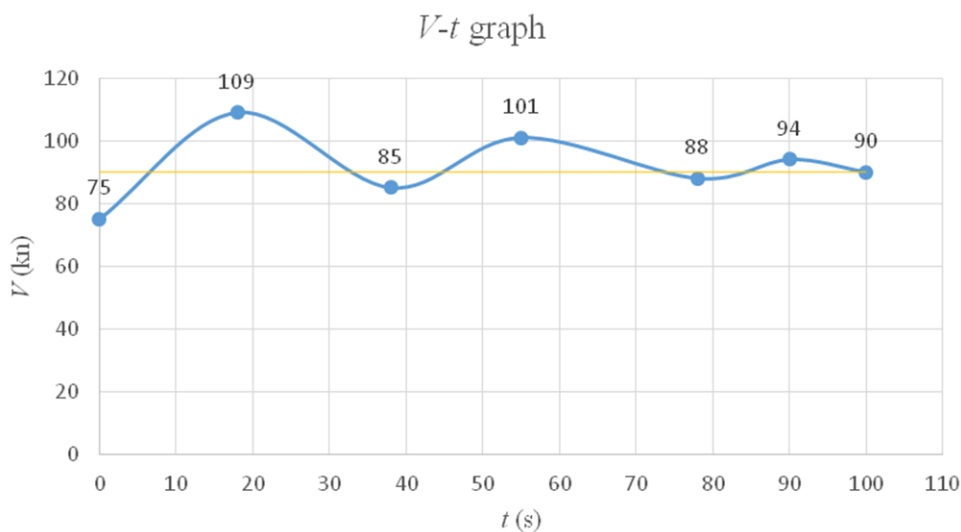
Graf slike 22 prikazuje gibanje od 80 sekundi, završnu ravnotežnu brzinu od 90 kn i visinu 2920 ft. Također je moguće očitati i sljedeće vrijednosti: $T = 26$ s, $\zeta = 0,065$, $t/2 = 51$ s



Slika 22. Graf dugoperiodičnog moda Cessne 172, $V_{trim} = 90$ kn, $h = 3000$ ft, $V_0 = 105$ kn, metoda slobodne palice

Na slici 23 može se vidjeti $V-t$ graf dugoperiodičnog moda Cessne 172 metodom držane palice sa ulaznim podacima: $V_{trim} = 90$ kn, $h = 5000$ ft, $V_0 = 75$ kn

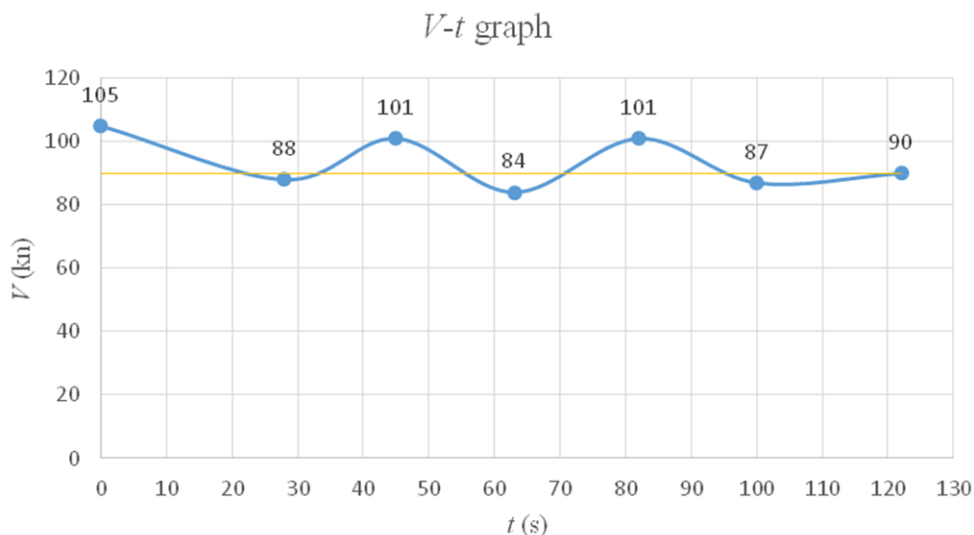
Graf slike 23 prikazuje gibanje od 100 sekundi, završnu ravnotežnu brzinu od 90 kn i visinu 4840 ft. Također je moguće očitati i sljedeće vrijednosti: $T = 35$ s, $\zeta = 0,23$, $t/2 = 27$ s



Slika 23. Graf dugoperiodičnog moda Cessne 172, $V_{trim} = 90$ kn, $h = 5000$ ft, $V_0 = 75$ kn, metoda držane palice

Na slici 24 može se vidjeti $V-t$ graf dugoperiodičnog moda Cessne 172 metodom držane palice sa ulaznim podacima: $V_{trim} = 90$ kn, $h = 5000$ ft, $V_0 = 105$ kn

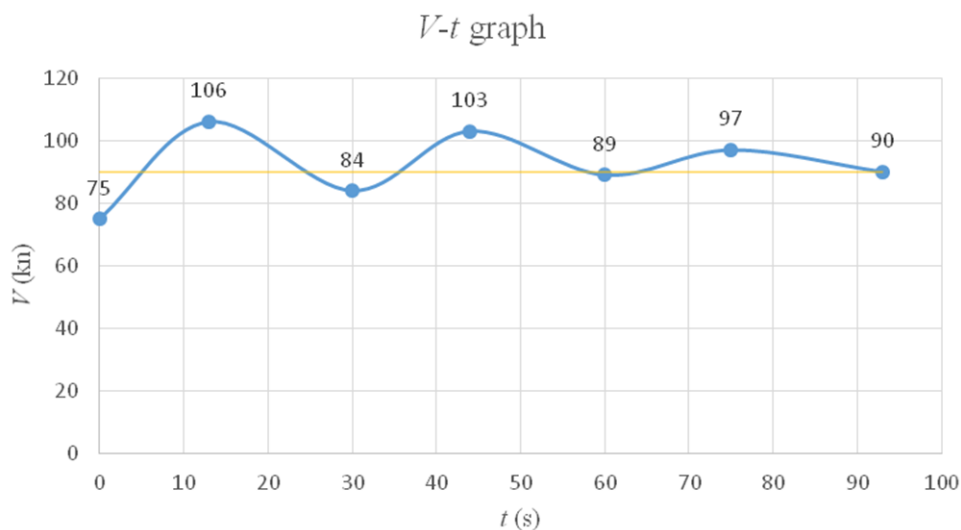
Graf slike 24 prikazuje gibanje od 122 sekundi, završnu ravnotežnu brzinu od 90 kn i visinu 4480 ft. Također je moguće očitati i sljedeće vrijednosti: $T = 38$ s, $\zeta = 0,31$, $t/2 = 98$ s



Slika 24. Graf dugoperiodičnog moda Cessne 172, $V_{trim} = 90$ kn, $h = 5000$ ft, $V_0 = 105$ kn, metoda držane palice.

Na slici 25 može se vidjeti $V-t$ graf dugoperiodičnog moda Cessne 172 metodom slobodne palice sa ulaznim podacima: $V_{trim} = 90$ kn, $h = 5000$ ft, $V_0 = 75$ kn

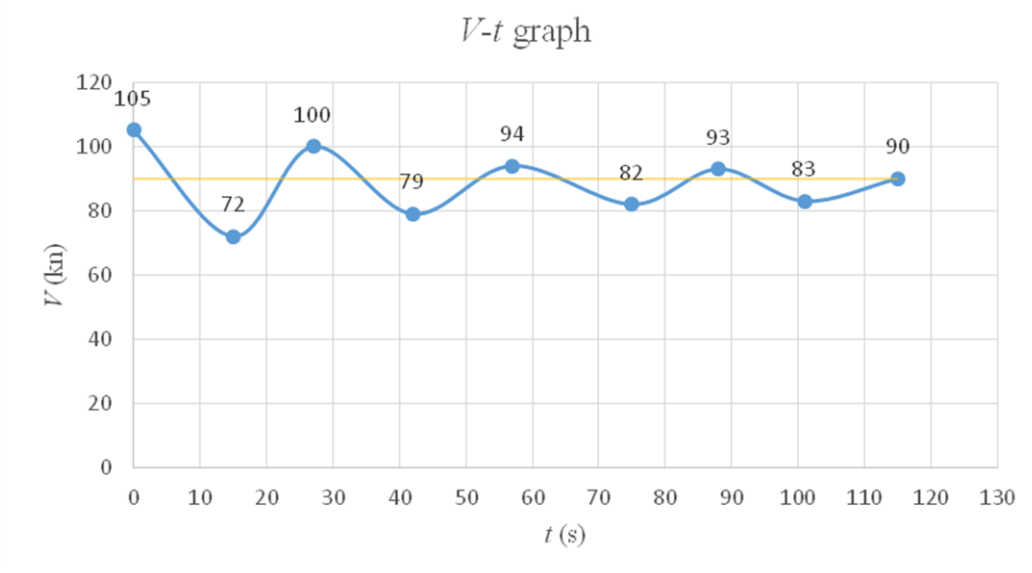
Graf slike 25 prikazuje gibanje od 93 sekunde, završnu ravnotežnu brzinu od 90 kn i visinu 4680 ft. Također je moguće očitati i sljedeće vrijednosti: $T = 31$ s, $\zeta = 0,36$, $t/2 = 24$ s



Slika 25. Graf dugoperiodičnog moda Cessne 172, $V_{trim} = 90$ kn, $h = 5000$ ft, $V_0 = 75$ kn, metoda slobodne palice

Na slici 26 može se vidjeti $V-t$ graf dugoperiodičnog moda Cessne 172 metodom slobodne palice sa ulaznim podacima: $V_{trim} = 90$ kn, $h = 5000$ ft, $V_0 = 105$ kn

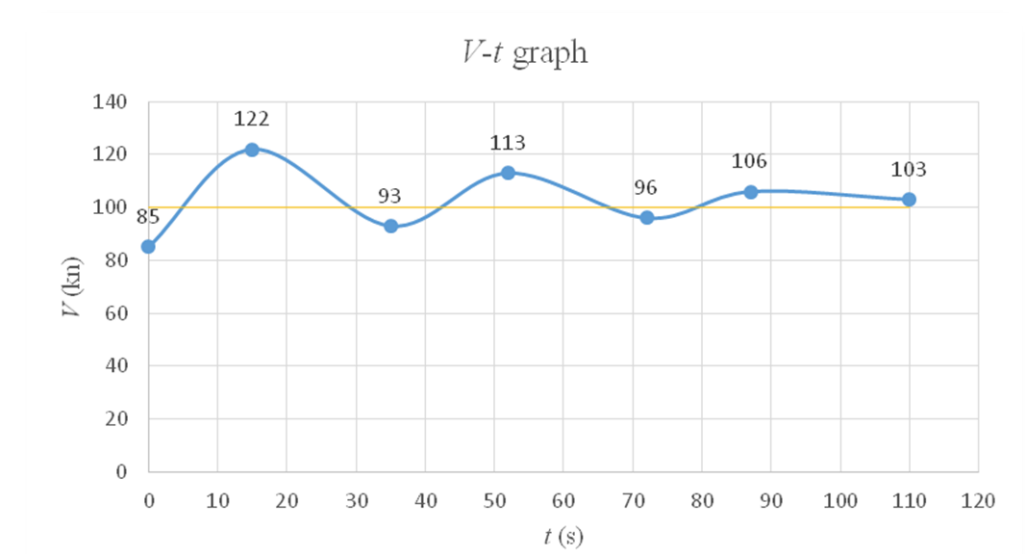
Graf slike 26 prikazuje gibanje od 115 sekunde, završnu ravnotežnu brzinu od 90 kn i visinu 5060 ft. Također je moguće očitati i sljedeće vrijednosti: $T = 29$ s, $\zeta = 0,10$, $t/2 = 38$ s



Slika 26. Graf dugoperiodičnog moda Cessne 172, $V_{trim} = 90$ kn, $h = 5000$ ft, $V_0 = 105$ kn, metoda slobodne palice

Na slici 27 može se vidjeti $V-t$ graf dugoperiodičnog moda Cessne 172 metodom držane palice sa ulaznim podacima: $V_{trim} = 100$ kn, $h = 3000$ ft, $V_0 = 85$ kn

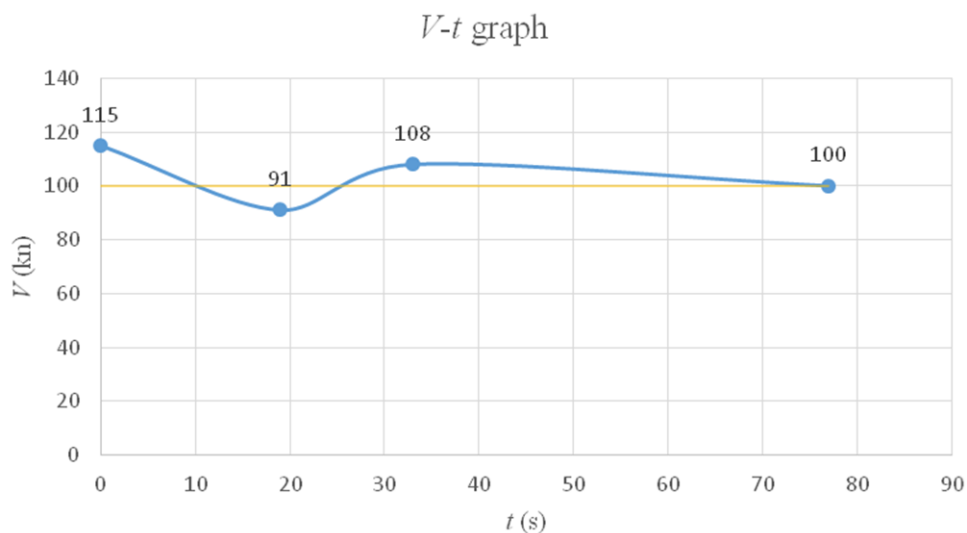
Graf slike 27 prikazuje gibanje od 110 sekunde, završnu ravnotežnu brzinu od 103 kn i visinu 2680 ft. Također je moguće očitati i sljedeće vrijednosti: $T = 36$ s, $\zeta = 0,15$, $t/2 = 33$ s



Slika 27. Graf dugoperiodičnog moda Cessne 172, $V_{trim} = 100$ kn, $h = 3000$ ft, $V_0 = 85$ kn, metoda držane palice

Na slici 28 može se vidjeti $V-t$ graf dugoperiodičnog moda Cessne 172 metodom držane palice sa ulaznim podacima: $V_{trim} = 100$ kn, $h = 3000$ ft, $V_0 = 115$ kn

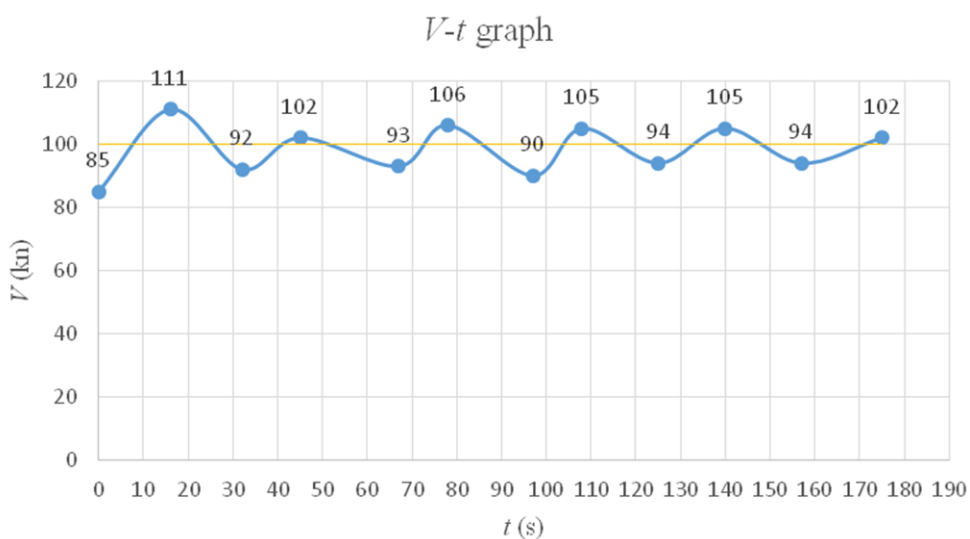
Graf slike 28 prikazuje gibanje od 77 sekunde, završnu ravnotežnu brzinu od 100 kn i visinu 2830 ft. Također je moguće očitati i sljedeće vrijednosti: $T = 46$ s, $\zeta = 0,10$, $t/2 = 36$ s



Slika 28. Graf dugoperiodičnog moda Cessne 172, $V_{trim} = 100$ kn, $h = 3000$ ft, $V_0 = 115$ kn, metoda držane palice

Na slici 29 može se vidjeti $V-t$ graf dugoperiodičnog moda Cessne 172 metodom slobodne palice sa ulaznim podacima: $V_{trim} = 100$ kn, $h = 3000$ ft, $V_0 = 85$ kn

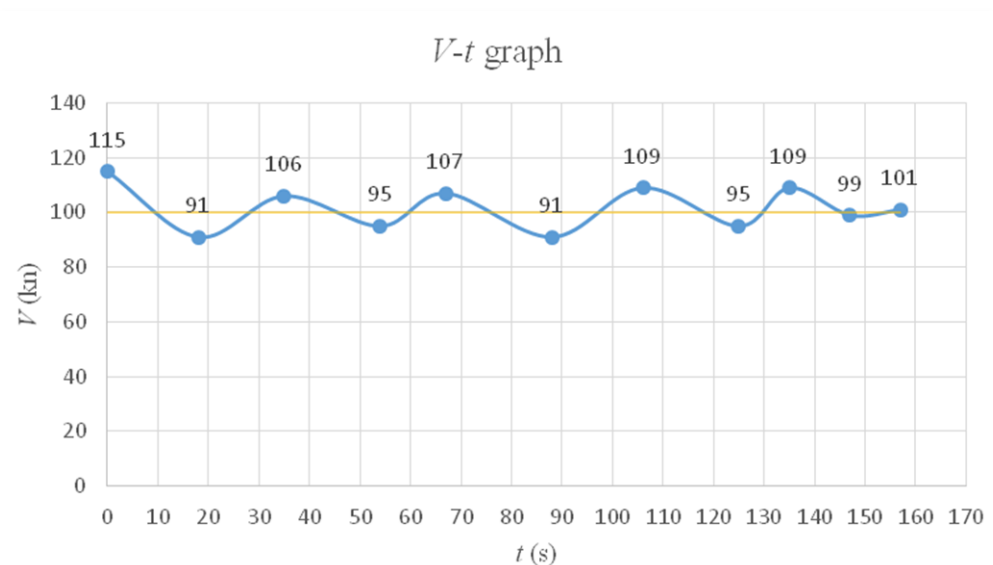
Graf slike 29 prikazuje gibanje od 175 sekundi, završnu ravnotežnu brzinu od 102 kn i visinu 3300 ft. Također je moguće očitati i sljedeće vrijednosti: $T = 32$ s, $\zeta = 0,095$, $t/2 = 36$ s



Slika 29. Graf dugoperiodičnog moda Cessne 172, $V_{trim} = 100$ kn, $h = 3000$ ft, $V_0 = 85$ kn, metoda slobodne palice

Na slici 30 može se vidjeti $V-t$ graf dugoperiodičnog moda Cessne 172 metodom slobodne palice sa ulaznim podacima: $V_{trim} = 100$ kn, $h = 3000$ ft, $V_0 = 115$ kn

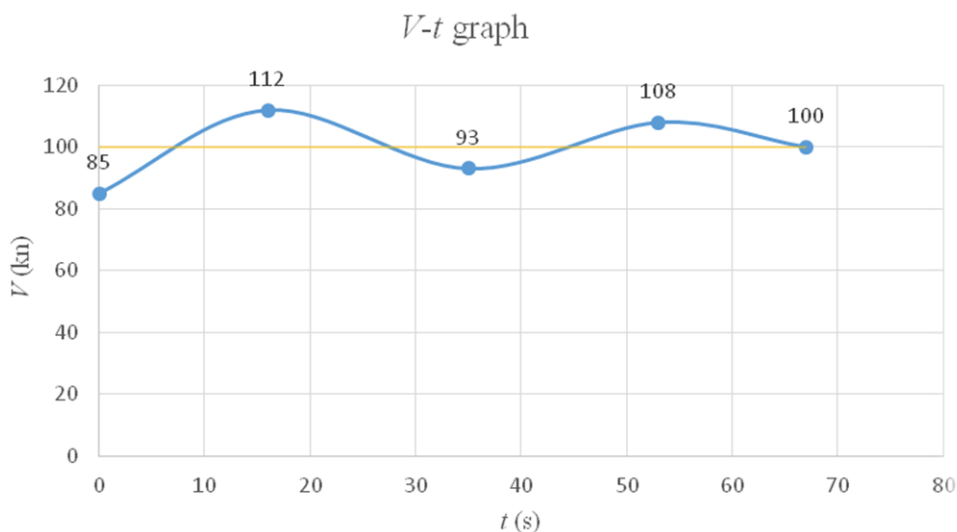
Graf slike 30 prikazuje gibanje od 157 sekundi, završnu ravnotežnu brzinu od 101 kn i visinu 2660 ft. Također je moguće očitati i sljedeće vrijednosti: $T = 32$ s, $\zeta = 0,22$, $t/2 = 27$ s



Slika 30. Graf dugoperiodičnog moda Cessne 172, $V_{trim} = 100$ kn, $h = 3000$ ft, $V_0 = 115$ kn, metoda slobodne palice

Na slici 31 može se vidjeti $V-t$ graf dugoperiodičnog moda Cessne 172 metodom držane palice sa ulaznim podacima: $V_{trim} = 100$ kn, $h = 5000$ ft, $V_0 = 85$ kn

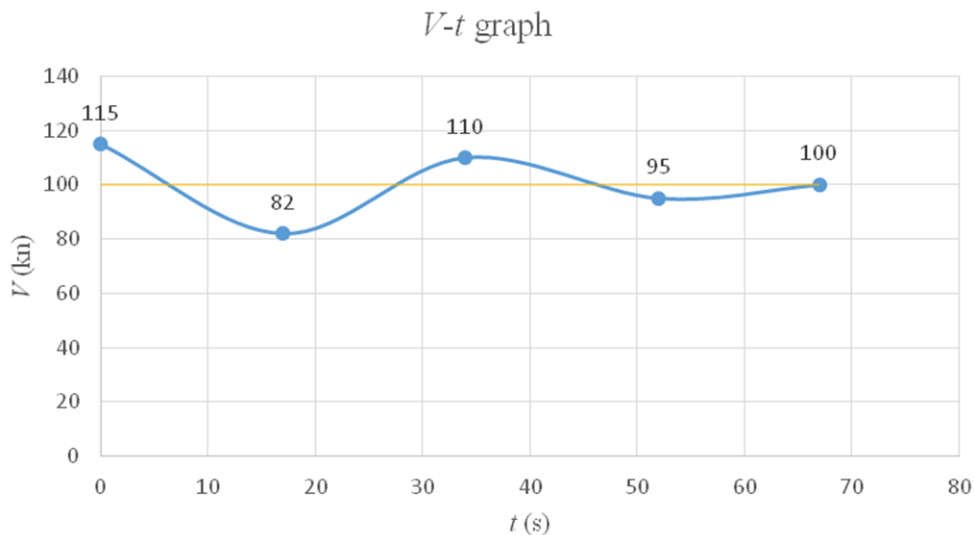
Graf slike 31 prikazuje gibanje od 67 sekundi, završnu ravnotežnu brzinu od 100 kn i visinu 4990 ft. Također je moguće očitati i sljedeće vrijednosti: $T = 35$ s, $\zeta = 0,07$, $t/2 = 33$ s



Slika 31. Graf dugoperiodičnog moda Cessne 172, $V_{trim} = 100$ kn, $h = 5000$ ft, $V_0 = 85$ kn, metoda držane palice

Na slici 32 može se vidjeti $V-t$ graf dugoperiodičnog moda Cessne 172 metodom držane palice sa ulaznim podacima: $V_{trim} = 100$ kn, $h = 5000$ ft, $V_0 = 115$ kn

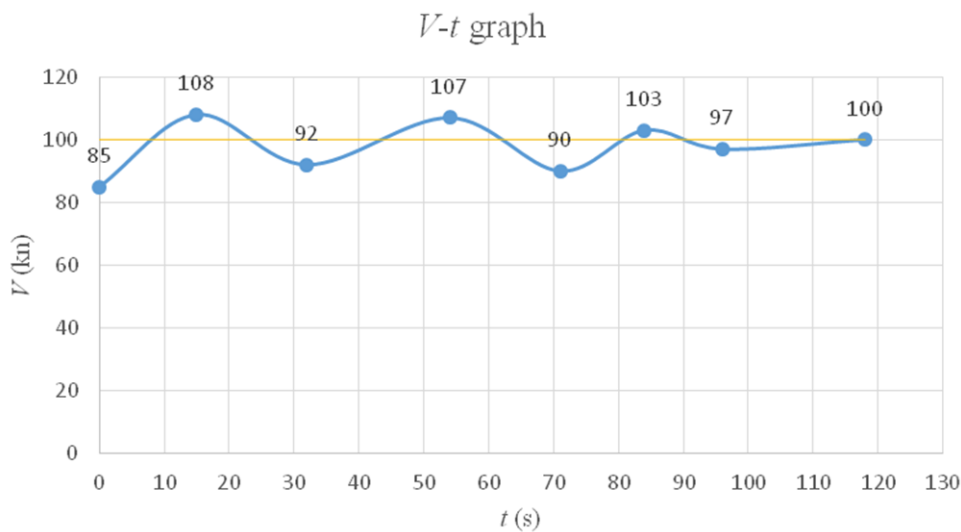
Graf slike 32 prikazuje gibanje od 67 sekundi, završnu ravnotežnu brzinu od 100 kn i visinu 5000 ft. Također je moguće očitati i sljedeće vrijednosti: $T = 34$ s, $\zeta = 0,13$, $t/2 = 44$ s



Slika 32. Graf dugoperiodičnog moda Cessne 172, $V_{trim} = 100$ kn, $h = 5000$ ft, $V_0 = 115$ kn, metoda držane palice

Na slici 33 može se vidjeti $V-t$ graf dugoperiodičnog moda Cessne 172 metodom slobodne palice sa ulaznim podacima: $V_{trim} = 100$ kn, $h = 5000$ ft, $V_0 = 85$ kn

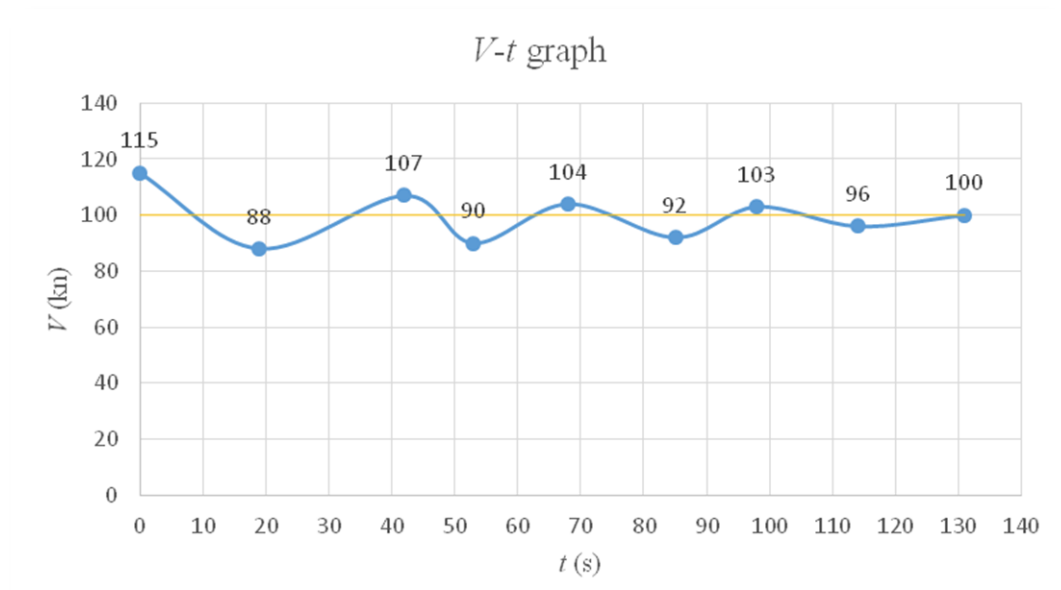
Graf slike 33 prikazuje gibanje od 118 sekundi, završnu ravnotežnu brzinu od 100 kn i visinu 5030 ft. Također je moguće očitati i sljedeće vrijednosti: $T = 34$ s, $\zeta = 0,12$, $t/2 = 35$ s



Slika 33. Graf dugoperiodičnog moda Cessne 172, $V_{trim} = 100$ kn, $h = 5000$ ft, $V_0 = 85$ kn, metoda slobodne palice

Na slici 34 može se vidjeti $V-t$ graf dugoperiodičnog moda Cessne 172 metodom slobodne palice sa ulaznim podacima: $V_{trim} = 100$ kn, $h = 5000$ ft, $V_0 = 115$ kn

Graf slike 34 prikazuje gibanje od 131 sekunde, završnu ravnotežnu brzinu od 100 kn i visinu 5000 ft. Također je moguće očitati i sljedeće vrijednosti: $T = 32$ s, $\zeta = 0,11$, $t/2 = 39$ s



Slika 34..Graf dugoperiodičnog moda Cessne 172, $V_{trim} = 100$ kn, $h = 5000$ ft, $V_0 = 115$ kn, metoda slobodne palice

5. TEORIJSKI IZRAČUNI ELEMENATA DUGOPERIODIČNOG MODA

U ovom poglavlju će se opisati postupak računanja i dobivanja podataka faktor prigušenja ζ , vremena da se amplituda priguši na polovinu početne vrijednosti $t/2$ i perioda T . Dobiveni podaci će se kasnije usporediti sa podacima dobivenim eksperimentalnim letom kako bi se pokazala razlika između teoretskih (savršenih) uvjeta i onih stvarnih dobivenih letenjem [2, 3].

5.1. OPIS IZRAČUNA ELEMENATA DUGOPERIODIČNOG MODA

Elementi koji će se računati biti će oni koji su se određivali eksperimentalnim letom iz $V-t$ grafova kako bi se mogla usporediti praksa i teorija. Ti elementi su vrijeme da se amplituda priguši na polovinu početne vrijednosti $t/2$, period T i faktor prigušenja ζ .

Prema [10] vrijeme da se amplituda priguši na polovinu početne vrijednosti računa se pomoću formule (1):

$$t_{1/2} = \frac{0.693}{g} V \frac{C_L}{C_D} \quad (1)$$

gdje oznake imaju sljedeće značenje:

- $t_{1/2}$ (s) - vrijeme da se amplituda priguši na polovinu početne vrijednosti, u sekundama .
- g (m/s^2) - gravitacijska akceleracija = 9,81 metara u sekundi na kvadrat.
- V (m/s) - brzina u odnosu na zrak (*true airspeed* – TAS). TAS je veća od indicirane brzine za 2 % na svakih 1000 ft visine. Mjerna jedinica je metar u sekundi.
- C_L - koeficijent uzgona zrakoplova.
- C_D - koeficijent otpora zrakoplova.

Prema [10] period T računa se pomoću formule (2):

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{2g}} V \cong 0.453V \quad (2)$$

gdje oznake imaju sljedeće značenje:

- T (s) – period

Prema [4] faktor prigušenja za dugoperiodični mod računa se pomoću formule (3):

$$\zeta_{p=1/\sqrt{2} \frac{C_D}{C_L}}$$

ili

$$\frac{0.707}{(L/D)}$$
(3)

Gdje oznake imaju sljedeće značenje:

- ζ – faktor prigušenja
- L/D – omjer uzgona i otpora, jednak je omjeru koeficijenta uzgona i koeficijenta otpora

Prema [14] koeficijent uzgona C_L se računa pomoću formule (4):

$$C_L = \frac{2 \cdot m \cdot g}{\rho \cdot V^2 \cdot S}$$
(4)

Gdje oznake imaju sljedeće značenje:

- m (kg) – masa zrakoplova
- ρ (kg/m³) – gustoća zraka
- V (kn) – brzina
- S (m²) – površina krila, za Cessnu 172 iznosi 16,2 m²

Prema [14] koeficijent otpora C_D se računa pomoću formule (5):

$$C_D = CD_0 + k \cdot C_L^2$$
(5)

Gdje oznake imaju sljedeće značenje:

- CD_0 – koeficijent otpora kod nultog uzgona, za Cessnu 172 iznosi 0,032
- k – konstanta, za Cessnu 172 iznosi 0,054

5.2. RJEŠENJA PARAMETARA DUGOPERIODIČNOG MODA

Tablica broj 5 prikazuje rješenja parametara dugoperiodičnog gibanja za Cessnu 172 koja su se dobila matematičkim izračunima iz prethodno navedenih formula. Rješenja dugoperiodičnog gibanja na ovaj način se mogu usporediti sa rezultatima dobivenih teorijskim letom kako bi se vidjela razlika između prakse i teorije odnosno između savršenih i stvarnih uvjeta.

Tablica 5. Rješenja parametara dugoperiodičnog moda gibanja za Cessnu 172

	Ulazni podaci			
Fizikalne veličine:	$V_{trim} = 90 \text{ kn}$ $h = 3000 \text{ ft}$	$V_{trim} = 90 \text{ kn}$ $h = 5000 \text{ ft}$	$V_{trim} = 100 \text{ kn}$ $h = 3000 \text{ ft}$	$V_{trim} = 100 \text{ kn}$ $h = 5000 \text{ ft}$
L/D	11,19	11,37	10,11	10,38
T (s)	22,24	23,06	24,69	25,64
$t/2$ (s)	38,81	40,88	38,92	41,50
ζ	0,063	0,062	0,070	0,068

5.3. USPOREDBA TEORIJSKIH REZULTATA I REZULTATA DOBIVENIH EKSPERIMENTALNIM LETOM

U tablicama 6, 7, 8 i 9 uspoređeni su rezultati elemenata dugoperiodičnog gibanja koji su dobiveni eksperimentalnim letom i rezultati dobiveni teorijskim izračunima. To su period T , vrijeme potrebno da se amplituda priguši na pola početne vrijednosti $t/2$ i faktor prigušenja ζ . Može se vidjeti kako u tablicama postoje po četiri rezultata za eksperiment, a samo jedan za teorijski izračun. Razlog tomu je što se eksperiment provodio metodom držane i slobodne palice i što se ravnotežna brzina u jednom načinu otklanjala na nižu, a u drugom načinu na višu brzinu od ravnotežne. U teorijskom načinu dobivanja rezultata te stvari ne igraju ulogu jer ih nema u formulama za izračun.

Iz tablica se može iščitati kako su vrijednosti perioda T u eksperimentu malo veće, za oko 9 sekundi. To bi značilo da bi u teoriji avion trebao malo češće oscilirati. $t/2$ je u prosjeku u teoriji skoro isti kao i u eksperimentu. Na kraju, faktor prigušivanja ζ je u prosjeku za oko 2,3 veći u eksperimentu, što bi značilo da se amplitude duplo bolje prigušuju u eksperimentu. U kombinaciji sa nešto dužim periodom to bi značilo da bi krivulje stabilnosti dugoperiodičnog moda u praksi i teoriji bile jako slične odnosno da bi se gibanje trebalo prigušiti nakon sličnog vremenskog perioda što je jako dobar pokazatelj stabilnosti aviona. Sva odstupanja rezultata od nekog prosjeka mogu se pripisati meteorološkoj situaciji, točnije trenutku kada će koja vrsta strujanja pogoditi zrakoplov. Ako to bude uzlazna struja u situaciji kada zrakoplov penje i smanjuje brzinu ona će biti destabilizirajuća, dok će ista vrsta strujanja djelovati stabilizirajuće u situaciji kada zrakoplov ponire i kada mu brzina raste.

Tablica 6. Usporedba teorijskih izračuna i rezultata sa eksperimentalnog leta za $V_{trim} = 90 \text{ kn}$ i $h = 3000 \text{ ft}$

	Rezultati iz teorijskih izračuna	Rezultati dobiveni iz eksperimentalnog leta			
Fizikalne veličine:	$V_{trim} = 90 \text{ kn}$ $h = 3000 \text{ ft}$	$V_{trim} = 90 \text{ kn}$ $h = 3000 \text{ ft}$ držana palica $V_0 = 75 \text{ kn}$	$V_{trim} = 90 \text{ kn}$ $h = 3000 \text{ ft}$ držana palica $V_0 = 105 \text{ kn}$	$V_{trim} = 90 \text{ kn}$ $h = 3000 \text{ ft}$ slobodna palica $V_0 = 75 \text{ kn}$	$V_{trim} = 90 \text{ kn}$ $h = 3000 \text{ ft}$ slobodna palica $V_0 = 105 \text{ kn}$
T (s)	22,24	32	19	26	26
$t/2$ (s)	38,81	62	17	55	51
ζ	0,063	0,12	0,21	0,12	0,065

Tablica 7. Usporedba teorijskih izračuna i rezultata sa eksperimentalnog leta za $V_{trim} = 90$ kn i $h = 5000$ ft

	Rezultati iz teorijskih izračuna	Rezultati dobiveni iz eksperimentalnog leta			
Fizikalne veličine:	$V_{trim} = 90$ kn $h = 5000$ ft	$V_{trim} = 90$ kn $h = 5000$ ft držana palica $V_0 = 75$ kn	$V_{trim} = 90$ kn $h = 5000$ ft držana palica $V_0 = 105$ kn	$V_{trim} = 90$ kn $h = 5000$ ft slobodna palica $V_0 = 75$ kn	$V_{trim} = 90$ kn $h = 5000$ ft slobodna palica $V_0 = 105$ kn
T (s)	23,06	35	38	31	29
$t/2$ (s)	40,88	27	98	24	38
ζ	0,062	0,23	0,31	0,36	0,10

Tablica 8. Usporedba teorijskih izračuna i rezultata sa eksperimentalnog leta za $V_{trim} = 100$ kn i $h = 3000$ ft

	Rezultati iz teorijskih izračuna	Rezultati dobiveni iz eksperimentalnog leta			
Fizikalne veličine:	$V_{trim} = 100$ kn $h = 3000$ ft	$V_{trim} = 100$ kn $h = 3000$ ft držana palica $V_0 = 85$ kn	$V_{trim} = 100$ kn $h = 3000$ ft držana palica $V_0 = 115$ kn	$V_{trim} = 100$ kn $h = 3000$ ft slobodna palica $V_0 = 85$ kn	$V_{trim} = 100$ kn $h = 3000$ ft slobodna palica $V_0 = 115$ kn
T (s)	24,69	36	46	32	32
$t/2$ (s)	38,92	33	36	36	27
ζ	0,070	0,15	0,10	0,095	0,22

Tablica 9. Usporedba teorijskih izračuna i rezultata sa eksperimentalnog leta za $V_{trim} = 100$ kn i $h = 5000$ ft

	Rezultati iz teorijskih izračuna	Rezultati dobiveni iz eksperimentalnog leta			
Fizikalne veličine:	$V_{trim} = 100$ kn $h = 5000$ ft	$V_{trim} = 100$ kn $h = 5000$ ft držana palica $V_0 = 85$ kn	$V_{trim} = 100$ kn $h = 5000$ ft držana palica $V_0 = 115$ kn	$V_{trim} = 100$ kn $h = 5000$ ft slobodna palica $V_0 = 85$ kn	$V_{trim} = 100$ kn $h = 5000$ ft slobodna palica $V_0 = 115$ kn
T (s)	25,64	35	34	34	32
$t/2$ (s)	41,50	33	44	35	39
ζ	0,068	0,07	0,13	0,12	0,11

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu je obrađena tematika upravljivosti i stabilnosti zrakoplova Cessne 172 kod dugoperiodičnog uzdužnog gibanja. Također je odrađen eksperimentalni let kojim su se ispitali parametri stabilnosti Cessne 172. Iz zabilježenih parametara su se crtali grafovi i određivali podaci koji su važni pokazatelji kako stabilnosti tako i upravljivosti, a i sigurnosti zrakoplova Cessna 172. Time je dokazana stabilnost i sigurnost navedenog zrakoplova kod dugoperiodičnog uzdužnog gibanja u stvarnim uvjetima. Podaci koji su se određivali iz podataka dobivenih eksperimentalnim letom, također su se i računali iz teorijskih podataka preko formula kako bi se mogla vidjeti razlika između prakse i teorije, koja naravno postoji.

Stabilnost i upravljivost su dva suprotna pojma. Ako je zrakoplov jako stabilan, on je malo upravljiv i obrnuto. Po definiciji, stabilnost zrakoplova je mogućnost da se zrakoplov nakon nekog poremećaja vrati u prvobitno stanje ravnoteže. S druge strane upravljivost je odziv zrakoplova na namjerni otklon upravljačkih površina. Stabilnost može biti statička i dinamička. Da bi zrakoplov bio dinamički stabilan on mora biti statički stabilan. Statički stabilan zrakoplov će imati inicijalni odziv vraćanja u ravnotežni položaj, dok će se dinamički stabilan zrakoplov vratiti u položaj ravnoteže nakon određenog vremenskog perioda. Uzdužna stabilnost zrakoplova je stabilnost oko njegove lateralne ili poprečne osi. Tu se razmatra propinjanje i poniranje zrakoplova koje zrakoplov koristi kako bi se vratio u stanje uzdužne ravnoteže. Gibanje oko uzdužne osi može biti kratkoperiodično i dugoperiodično. Bitnije za ovaj rad, dugoperiodično gibanje je gibanje zrakoplova oko lateralne osi, skoro konstantnog napadnog kuta u kojemu se mijenjaju brzina i visina dok se ono ne priguši. Potreban je određen vremenski period da se priguši i pilotu je ono lako zamjetno.

Cessna 172 je američki visokokrilni jednomotorni zrakoplov sa četiri sjedala. Cessna 172 je najpopularniji školski zrakoplov na svijetu zbog toga što je to siguran, pouzdan i stabilan zrakoplov. Stabilnosti tog zrakoplova doprinose visoka *dihedralna* krila i motor s prednje strane koji daje stabilizirajući moment zrakoplovu. Također to je zrakoplov proizveden u najviše primjeraka, preko. Eksperimentalni let kojim su se ispitali parametri dugoperiodičnog moda održani su na Cessni 172, registracijske oznake 9A-DMB. Performanse zrakoplova koje su najbitnije za održavanje tog leta su brzine od 90 i 100 kn. 90 kn je brzina koja se u teoriji postiže sa korištenjem 45 % maksimalne raspoložive snage motora te ta brzina zrakoplovu daje najdužu istrajnost i najdulji dolet. 100 kn je brzina najčešće korištena za krstarenje jer ona uz minimalno povećanje u potrošnji daje za 10 kn veću brzinu od brzine najduljeg doleta i najveće istrajnosti, ta brzina postiže se sa 55 % snage. Minimalna brzina na kojoj zrakoplov može letjeti u čistoj konfiguraciji je brzina sloma uzgona od 47 kn.

Eksperimentalni let je let održan 16.07.2022. godine u svrhu ispitivanja uzdužne stabilnosti dugoperiodičnog moda zrakoplova Cessna 172, trajao je jedan sat i 33 minute. Mjesto leta bila je zona iznad Ludbrega. Meteorološke pojave koje su najviše utjecale na let, a kasnije i na rezultate, bila su uzlazno silazna strujanja zbog razvoja kumululus naoblake što se najviše osjetilo u testovima koji su se izvodili na visini od 3000 ft, a nešto manje u onima na 5000 ft. Ispitivanje dugoperiodičnog moda se izvodilo na visinama od 3000 ft, 5000 ft, sa brzinama od 90 i 100 kn, također su se ispitivale metode držane slobodne palice. Test bi se provodio tako da bi zrakoplov bio uravnotežen u horizontalnom letu na brzini od 90 ili 100 kn, na visini od 3000 ili 5000 ft, tada bi se postavila naljepnica iza volana koja bi obilježila položaj upravljača koji u tim uvjetima daje brzinu za uravnotežen horizontalni let, nakon toga bi se volan otklonio kako bi se brzina smanjila ili povećala (provedene su obje vrste testa) za 15 kn i u tom položaju bi se volan zadržao par sekundi, nakon toga

bi se volan (za metodu držane palice) vratio na položaj obilježen naljepnicom za ravnotežnu brzinu gdje bi bio zadržan rukom te bi se u tom trenutku upalila štoperica. Podaci koji bi se uzimali bi bile brzina (maksimalna i minimalna), vrijeme (u sekundama) tih brzina te visine zrakoplova sve dok se zrakoplov ponovno ne vrati u stanje ravnoteže, odnosno dok se ne ustabilu na nekoj brzini. Kod metode slobodnom palicom, razlika u odnosu na metodu držane palice je samo u tome što kada se volan vrati nazad na položaj obilježen naljepnicom za ravnotežnu brzinu bude pušten a ne rukom zadržan u tom položaju tijekom rađenja testa kako bi se horizontalna repna površina slobodno gibala u zraku. Također su se osim navedenih vrijednosti zapisivale vrijednosti broja okretaja, vanjske temperature i goriva pomoću kojeg se računala udaljenost težišta od protupožarnog zida koja se naravno potrošnjom goriva generalno micala naprijed, no pošto su ti pomaci bili mali može se zaključiti da oni u stvarnim uvjetima nisu imali vidljiv utjecaj na uzdužnu stabilnost dugoperiodičnog moda. Iz navedenih podataka o brzinama i vremenu odredili su se $V-t$ grafovi karakteristični za dugoperiodični mod. Iz navedenih grafova su se odredili faktor prigušenja ζ , vrijeme potrebno da se amplituda priguši na pola vrijednosti $t/2$ i period T tj. vrijeme između dvije amplitude. To su vrijednosti koje brojčano opisuju grafove kako bi se ti rezultati mogli usporediti sa teorijskim. Generalan zaključak grafova i testova je taj da je Cessna 172 stabilan zrakoplov koji se u svakom testu vratio u ravnotežu. U nekim testovima se to desilo prije, u nekima poslije, no uvijek se zrakoplov vratio u ravnotežno stanje. U većini testova brzina na koju se zrakoplov vratio u ravnotežno stanje je bila ista kao i početna ravnotežna brzina, što se visina tiče one su češće bile različite od početne nego iste. Također se generalno da zaključiti kako je metoda držane palice malo stabilnija, bolje prigušena s manje oscilacija od metode slobodne palice. Između ostalog ustvrdilo se kako su rezultati na 5000 ft isпали pravilniji i stabilniji, bliže onomu kako bi trebali ispasti u teoriji, razlog tomu su već navedena uzlazna silazna strujanja koja su bila dominantna ispod 5000 ft.

Na kraju, da bi se pokazala razlika između teorije i prakse, između stvarnih i savršenih uvjeta, preko formula sa ulaznim teorijskim podacima za Cessnu 172 izračunati su rezultati za faktore prigušenja ζ tj. broj koji govori koliko dobro se amplitude prigušuju, periode T tj. vrijeme između dvije maksimalne amplitude i vrijeme potrebno da se amplituda priguši na pola početne vrijednosti $t/2$. Generalno u prosjeku, vrijeme da se amplituda priguši na pola početne vrijednosti je skoro isto u teoriji i u praksi. Periodi su u teoriji za oko 9 sekundi kraći u prosjeku nego oni periodi u praksi, što znači brže, češće osciliranje oko ravnotežne brzine u teoriji. S druge strane faktor prigušenja je u praksi za oko 2,3 puta veći od onoga u teoriji. Kada se svi ti podaci uzmu u obzir dobila bi se dva slična grafa stabilnosti dugoperiodičnog moda za praksu i teoriju. Onaj teoretski bi bio pravilniji sa više kraćih amplitude dok bi onaj praktični zbog nešto dužih perioda ali i boljeg faktora prigušivanja bio sa dužim razmakom između amplitude ali sa manje njih. Dobivena dva grafa bila bi dokaz stabilnost u vrlo sličnom vremenskom intervalu. Naravno, u eksperimentu su dobiveni neki rezultati koji su odstupali od prosjeka, što se može pripisati meteorološkoj situaciji. S jedne strane taj visok stupanj sigurnosti će se zasigurno odraziti, na za mnoge nepovoljan, stupanj upravljivosti. No gledano s druge strane, taj visok stupanj stabilnosti u praksi je zasigurno dobar pokazatelj što je najvažnije sigurnosti, a i pouzdanosti najpopularnijeg školskog zrakoplova na svijetu, u ovome slučaju staroga preko 40 godina.

LITERATURA

- [1] J. D. A. Jr., *Introduction to flight*, USA: McGraw-Hill book company, 1989..
- [2] K. Krajčec Nikolić. *Stabilnost zrakoplova*. [Prezentacija] Teorija leta II. Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu. 10. Ožujka 2020.
- [3] Airplane Tech Talk. *Longitudinal Stability Of Aircraft*. Preuzeto s: https://www.youtube.com/watch?v=Aleg_FxO_n0&ab_channel=AirplaneTechTalk [Pristupljeno: 1. Srpnja 2022.]
- [4] Ralph D. Kimberlin. *Flight Testing of Fixed Wing Aircraft*. Tennessee: American Institute of Aeronautics and Astronautics; 1801. Preuzeto s: https://books.google.hr/books/about/Flight_Testing_of_Fixed_Wing_Aircraft.html?id=IdWmOwceEtIC&redir_esc=y [Pristupljeno: 2. Srpnja 2022.]
- [5] Faculty of transport and traffic sciences, University of Zagreb. *Fleet and Facilities*. Preuzeto s: https://www.fpz.unizg.hr/zan/?page_id=822 [Pristupljeno: 3. Srpnja 2022.]
- [6] Wikipedia. *Cessna 172*. Preuzeto s: https://en.wikipedia.org/wiki/Cessna_172#World_records [Pristupljeno: 4. Srpnja 2022.]
- [7] Jetphotos. *9A-DMB*. Preuzeto s: <https://www.jetphotos.com/photo/8420557> [Pristupljeno: 6. Srpnja 2022.]
- [8] Cessna Aircraft Company. *Pilot's operating handbook Cessna skyhawk 1978 model 172n*. Wichita, Kansas: Cessna Aircraft Company; 1978.
- [9] European Aviation Safety Agency. *Certification Specifications for Normal, Utility, Aerobatic, and Commuter Category Aeroplanes CS-23*. Preuzeto s: <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/agency-measures-docs-certification-specifications-CS-23-CS-23-Amdt-3.pdf> [Pristupljeno 12. Srpnja 2022.]
- [10] Hubert C. Smith. *Introduction to Aircraft Flight Test Engineering*. Sanderson: jeppesen sanderson; 1988. Preuzeto s: https://books.google.hr/books/about/Introduction_to_Aircraft_Flight_Test_Eng.html?id=jPLkAAAAMA&redir_esc=y [Pristupljeno: 13. Srpnja 2022.]
- [11] William Harvey Siren. *A FLIGHT TEST DETERMINATION OF THE STATIC AND DYNAMIC LONGITUDINAL STABILITY OF THE CESSNA 31 OH AIRCRAFT*. Monterey, California; 1975. Preuzeto s: <https://core.ac.uk/download/pdf/36714104.pdf> [Pristupljeno: 13. Srpnja 2022.]
- [12] Wikipedia. *Damping*. Preuzeto s: https://en.wikipedia.org/wiki/Damping#/media/File:2nd_Order_Damping_Ratios.svg [Pristupljeno: 15. Srpnja 2022.]
- [13] Skynet. *W&B C-172N*. Preuzeto s: <https://skynet.fpz.hr/assets/files/412def0b09b2149cd693fe0b2111da3e.pdf> [Pristupljeno: 18. Srpnja 2022.]

[14] Mohammad H. Sadraey. *Aircraft Performance An Engineering Approach*. Natick: The MathWorks, inc; 2016. Preuzeto s: <https://books.google.hr/books?id=ldIBDgAAQBAJ&pg=SA7-PA21&dq=cessna+172+zero+lift+drag&hl=hr&sa=X&ved=2ahUKEwjBuLObpP75AhXII4sKHdNzA7UQ6AF6BAgJEA#v=onepage&q&f=false> [Pristupljeno : 31. Srpnja 2022.]

POPIS SLIKA:

Slika 1. Primjer pozitivne statičke stabilnosti [1]	3
Slika 2. Primjer neutralne statičke stabilnosti [1]	3
Slika 3. Primjer negativne statičke stabilnosti tj. statičke nestabilnosti [1]	3
Slika 4. Primjeri dinamičke neutralnosti, stabilnosti i nestabilnosti [12].....	4
Slika 5. Grafički prikaz uzdužne statičke stabilnosti [2].....	5
Slika 6. Pozitivna uzdužna statička stabilnost [3]	6
Slika 7. Neutralna uzdužna statička stabilnost [3]	6
Slika 8. Negativna uzdužna statička stabilnost [3].....	6
Slika 9. Dugoperiodični mod., ovisnost nagiba oko poprečne osi i vremena pri približno konstantnom napadnom kutu [2].....	7
Slika 10. Dugoperiodični mod., ovisnost brzine i vremena [4].....	8
Slika 11. Cessna 172, 9A-DMB [7]	9
Slika 12. Dimenzije Cessne 172, 9A-DMB [8].....	10
Slika 13. Dolet zrakoplova Cessna 172, 9A-DMB pri različitim brzinama, masi 2300 lb i standardnoj temperaturi [8]	12
Slika 14. Istrajnost zrakoplova Cessna 172, 9A-DMB pri različitim postavkama snage, masi 2300 lb i standardnoj temperaturi [8]	13
Slika 15. Faktor prigušenja, različite vrijednosti [12].....	16
Slika 16. W&B, Cessna 172, 9A-DMB [13].....	17
Slika 17. Prikaz određivanja omjera amplituda u pola ciklusa i prikaz dobivanja faktora prigušenja [4]	22
Slika 18. Način određivanja $t/2$ [10]	23
Slika 19. Graf dugoperiodičnog moda Cessne 172, $V_{trim} = 90kn$, $h = 3000ft$, $V_0 = 75kn$, metoda držane palice	23
Slika 20. Graf dugoperiodičnog moda Cessne 172, $V_{trim} = 90kn$, $h = 3000ft$, $V_0 = 105kn$, metoda držane palice	24
Slika 21. Graf dugoperiodičnog moda Cessne 172, $V_{trim} = 90kn$, $h = 3000ft$, $V_0 = 75kn$, metoda slobodne palice	24
Slika 22. Graf dugoperiodičnog moda Cessne 172, $V_{trim} = 90kn$, $h = 3000ft$, $V_0 = 105 kn$, metoda slobodne palice	25
Slika 23. Graf dugoperiodičnog moda Cessne 172, $V_{trim} = 90 kn$, $h = 5000 ft$, $V_0 = 75 kn$, metoda držane palice	25
Slika 24. Graf dugoperiodičnog moda Cessne 172, $V_{trim} = 90 kn$, $h = 5000 ft$, $V_0 = 105 kn$, metoda držane palice.	26
Slika 25. Graf dugoperiodičnog moda Cessne 172, $V_{trim} = 90 kn$, $h = 5000 ft$, $V_0 = 75 kn$, metoda slobodne palice	26
Slika 26. Graf dugoperiodičnog moda Cessne 172, $V_{trim} = 90 kn$, $h = 5000 ft$, $V_0 = 105 kn$, metoda slobodne palice	27
Slika 27. Graf dugoperiodičnog moda Cessne 172, $V_{trim} = 100 kn$, $h = 3000 ft$, $V_0 = 85 kn$, metoda držane palice	27
Slika 28. Graf dugoperiodičnog moda Cessne 172, $V_{trim} = 100 kn$, $h = 3000 ft$, $V_0 = 115 kn$, metoda držane palice	28
Slika 29. Graf dugoperiodičnog moda Cessne 172, $V_{trim} = 100 kn$, $h = 3000 ft$, $V_0 = 85 kn$, metoda slobodne palice	28
Slika 30. Graf dugoperiodičnog moda Cessne 172, $V_{trim} = 100 kn$, $h = 3000 ft$, $V_0 = 115 kn$, metoda slobodne palice	29
Slika 31. Graf dugoperiodičnog moda Cessne 172, $V_{trim} = 100 kn$, $h = 5000 ft$, $V_0 = 85 kn$, metoda držane palice	29
Slika 32. Graf dugoperiodičnog moda Cessne 172, $V_{trim} = 100 kn$, $h = 5000 ft$, $V_0 = 115 kn$, metoda držane palice	30

Slika 33. Graf dugoperiodičnog moda Cessne 172, $V_{\text{trim}} = 100$ kn, $h = 5000$ ft, $V_0 = 85$ kn, metoda slobodne palice	30
Slika 34. Graf dugoperiodičnog moda Cessne 172, $V_{\text{trim}} = 100$ kn, $h = 5000$ ft, $V_0 = 115$ kn, metoda slobodne palice	31

POPIS TABLICA:

Tablica 1. Zabilježeni podaci sa eksperimentalnog leta za određivanje dugoperiodičnog moda sa ulaznim podacima od 90 kn i 3000 ft metodama držane i slobodne palice	18
Tablica 2. Zabilježeni podaci sa eksperimentalnog leta za određivanje dugoperiodičnog moda sa ulaznim podacima od 90 kn i 5000 ft metodama držane i slobodne palice	19
Tablica 3. Zabilježeni podaci sa eksperimentalnog leta za određivanje dugoperiodičnog moda sa ulaznim podacima od 100 kn i 3000 ft metodama držane i slobodne palice	20
Tablica 4. Zabilježeni podaci sa eksperimentalnog leta za određivanje dugoperiodičnog moda sa ulaznim podacima od 100 kn i 5000 ft metodama držane i slobodne palice	21
Tablica 5. Rješenja parametara dugoperiodičnog moda gibanja za Cessnu 172	34
Tablica 6. Usporedba teorijskih izračuna i rezultata sa eksperimentalnog leta za $V_{trim} = 90$ kn i $h = 3000$ ft	34
Tablica 7. Usporedba teorijskih izračuna i rezultata sa eksperimentalnog leta za $V_{trim} = 90$ kn i $h = 5000$ ft	35
Tablica 8. Usporedba teorijskih izračuna i rezultata sa eksperimentalnog leta za $V_{trim} = 100$ kn i $h = 3000$ ft	35
Tablica 9. Usporedba teorijskih izračuna i rezultata sa eksperimentalnog leta za $V_{trim} = 100$ kn i $h = 5000$ ft	35

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
Vukelićeva 4, 10000 Zagreb

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je završni rad
(vrsta rada)

isključivo rezultat mojega vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu, a što pokazuju upotrijebljene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedopušten način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem, također, da 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/diplomskog rada pod naslovom Ocjena kvalitete upravljanja za dugoperiodični mod uzdužnog zrakoplova Cessna 172, u Nacionalni repozitorij završnih i diplomskih radova ZIR.

Student/ica:

U Zagrebu, 27.8.2022

Mateo Mrnjavac *Mrnjavac*
(ime i prezime, potpis)